

**UNIVERSIDAD DE VALENCIA**

**Departamento de Didáctica  
de las Ciencias Experimentales y Sociales**

**EL CONCEPTO DE FUERZA ELECTROMOTRIZ EN CURSOS  
INTRODUCTORIOS DE FÍSICA EN LA UNIVERSIDAD:  
Dificultades de Aprendizaje y la Presentación del Concepto en  
los Libros de Texto**

**Tesis Doctoral  
Isabel Garzón Barragán**

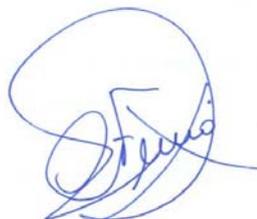
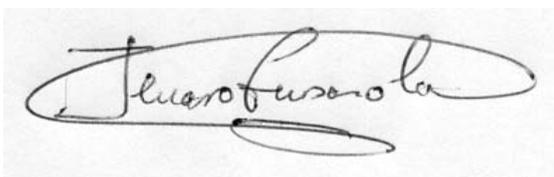
**Dirigida por:  
Dr. Jenaro Guisasola Aranzabal  
Dr. Carles Josep Furió Más**

**Valencia, 2012**

Jenaro Guisasola Aranzabal, Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad del País Vasco y profesor titular del Departamento de Física Aplicada I de la Universidad del País Vasco, y Carles Josep Furió Más, Doctor en Ciencias Químicas por la Universitat de València y catedrático jubilado de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Universitat de València.

CERTIFICAMOS que la presente memoria con el título *“El concepto de fuerza electromotriz en cursos introductorios de física en la universidad: Dificultades de aprendizaje y la presentación del concepto en los libros de texto”*, ha sido realizada por Isabel Garzón Barragán bajo nuestra dirección y constituye la tesis para optar al grado de Doctor.

Para que conste, y en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos este certificado en Valencia a veintiocho de Junio de dos mil doce.



*A la memoria de mi padre*

*A mi madre Eloísa y a mis hijos Sofía y Pablo*

## **Agradecimientos**

*Sería largo mencionar a todas las personas a las que desearía agradecer su ayuda en la realización de esta tesis. Aun sabiendo que no las nombraré a todas, y esperando que lo entiendan, no puedo dejar de mencionar:*

*A mi madre Eloísa por su apoyo permanente y por asumir mi papel con mi Sofía en las estancias que he estado lejos de nuestro hogar.*

*A mi hijo Pablo porque siempre he sentido su apoyo y comprensión; así mismo a mi pequeña Sofía que me ha apoyado y animado con su deseo de ver culminado este trabajo.*

*A mi tutor Jenaro Guisasola por permitirme la bella oportunidad de conocerle y sentir su apoyo incondicional y constante.*

*A mi tutor Carles Furió por su apoyo, amabilidad, generosidad y confianza desde el inicio.*

*Al "Grupo de Investigación en Enseñanza de la Física, Matemáticas y Tecnología de la Universidad del País Vasco", coordinado por el profesor Jenaro Guisasola, por su apoyo a través de las becas que me permitieron pasar varias estancias en San Sebastián-País Vasco, determinantes en la culminación de este trabajo.*

*A la Universidad Pedagógica Nacional-Colombia, por otorgarme la Comisión de Estudios para finalizar este proyecto.*

# INDICE

<b>Capítulo 1: Introducción General</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.1.1 Estado del tema en la Enseñanza de la Física: dificultades de enseñanza-aprendizaje en estudios sobre el concepto de fuerza electromotriz – fem	3
1.1.2 Preguntas que aborda esta investigación	22
1.2 Análisis Epistemológico y Formulación Actual del Concepto de Fuerza Electromotriz-fem	23
1.2.1 ¿En qué contribuye la historia y la filosofía de la Física en la enseñanza y aprendizaje de la Física?	24
1.2.2 Evolución del concepto de fem desde su origen en el siglo XVIII hasta el momento actual	28
a. Contexto teórico en el que se desarrolla el trabajo de Volta	29
b. Situación problemática que da origen al concepto de fuerza electromotriz	33
c. Teoría del potencial y su aplicación al análisis de los circuitos de corriente continua	39
d. De la acción a distancia a la acción contigua: el concepto de campo	45
e. Descubrimiento del fenómeno de inducción electromagnética y su relación con el concepto de fuerza electromotriz	52
f. Teoría actual: la fem y la diferencia de potencial dos conceptos epistemológicamente diferentes pero relacionados	57
<b>Capítulo 2: Metodología</b>	<b>71</b>
2.1 Hipótesis de la investigación	71
2.2 Marco teórico	73

2.2.1	Significado y breve historia del Constructivismo	75
2.2.2	Premisas fundamentales del Constructivismo que orientan esta investigación	84
2.2.3	Enfoques constructivistas para caracterizar las concepciones de los estudiantes y el aprendizaje de las ciencias	89
	a. Perspectivas cognitivas. Aprendizaje de la ciencia como adquisición	90
	b. Perspectivas socioculturales. Aprendizaje de la ciencia como adquisición	94
	c. Aprendizaje de la ciencia como participación	96
	d. Perspectiva integradora del aprendizaje de la ciencia	97
2.3	Enfoque metodológico	98
2.3.1	¿Qué es la fenomenografía?	99
2.3.2	Categorías de descripción desde la perspectiva fenomenográfica	104
2.3.3	Entrevistas: Análisis de la Argumentación	109
2.3.4	Análisis de los libros de texto	118
2.4	Diseños experimentales	121
2.4.1	Cuestionarios y criterios de análisis	121
	a. Primer cuestionario	123
	b. Segundo cuestionario	126
	c. Tercer cuestionario	128
2.4.2	Entrevistas y criterios de análisis	131
2.4.3	Criterios y protocolo de análisis de los libros de texto	134
	a. Primer criterio: Presentación del concepto de fem	134
	b. Segundo criterio: Perspectivas macroscópica y microscópica	135
	c. Tercer criterio: Oportunidades para trabajar las habilidades científicas y construir el conocimiento	137
	d. Cuarto criterio: Ciencia en contexto	137
<b>Capítulo 3: Resultados y Desarrollo Argumental</b>		<b>140</b>
3.1	Resultados de la aplicación de los cuestionarios	141
3.1.1	Resultados del primer cuestionario	144

3.1.2	Resultados del segundo cuestionario	153
3.1.3	Resultados del tercer cuestionario	159
3.2	Análisis de las entrevistas	167
3.2.1	Análisis de la primera entrevista	168
3.2.2	Análisis de la segunda entrevista	175
3.3	Análisis de los libros de texto	179
<b>Capítulo 4: Conclusiones Finales y Perspectivas de Trabajo</b>		204
<b>Bibliografía</b>		210
<b>Anexo: Bibliografía Libros de Texto Analizados</b>		224

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN GENERAL

*“Los conceptos físicos son creaciones libres del espíritu humano y no están, por más que parezca, únicamente determinados por el mundo exterior”*

*(Einstein e Infeld 1939, p.34)*

En este capítulo se presentan el planteamiento del problema de investigación y un análisis histórico y epistemológico del concepto de fem y su formulación actual.

En lo que concierne al planteamiento del problema, en la primera parte se aborda el estado del tema en la enseñanza de la física; y en la segunda parte, se presentan las preguntas que aborda esta investigación.

El análisis histórico y epistemológico del concepto de fem se aborda desde sus orígenes a finales del siglo XVIII, hasta su formulación actual. Este apartado trata de dar respuesta a la primera pregunta de la investigación.

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La persistencia de concepciones alternativas en los estudiantes, incluso de niveles universitarios y entre profesores (Pfundt y Duit 1998) son dificultades de la práctica docente sin resolver que ponen en evidencia la necesidad de investigar en las dificultades de comprensión de unos y otros, para orientar la búsqueda de estrategias que disminuyan la incidencia de tales concepciones.

Hay evidencia de investigaciones (Guisasola et al. 2011, Guisasola et al. 2010, McDermott y Shaffer 1992), incluido este trabajo, de que algunas concepciones alternativas (interpretaciones de los estudiantes que están en conflicto con el

concepto formal como es entendido por un físico experto) acerca de diversos temas de la teoría electromagnética (por ejemplo, circuitos eléctricos, inducción electromagnética, corriente eléctrica, capacitancia, campo, carga, fuerza electromotriz, etc.) son comunes entre estudiantes quienes han recibido enseñanza formal en dichos temas. Resultados de estudios interculturales indican que ideas incorrectas similares florecen en países con sistemas de educación similares (Shipstone et al. 1988). También es notable que el éxito en solucionar problemas cuantitativos no es una medida segura de comprensión conceptual. Profesores tanto a nivel de secundaria como de universidad corroboran que los estudiantes que pueden solucionar problemas cuantitativos estándar frecuentemente no pueden responder preguntas cualitativas simples basadas en los mismos conceptos físicos (Guisasola et al. 2008a, Kim y Pak 2002, Arons 1982). Este hecho sugiere la presencia de dificultades que subyacen y que al parecer no suelen ser adecuadamente atendidas en la enseñanza tradicional de la física.

El conocimiento de las dificultades de los estudiantes de conceptos básicos como el de fuerza electromotriz (fem), en cursos introductorios de física a nivel universitario, podría ayudar a alcanzar más fácilmente algunos objetivos de enseñanza. En particular, hay algunos objetivos básicos que probablemente muchos profesores están de acuerdo en su importancia (McDermott 1991). Al completar tal curso, los estudiantes deberían haber adquirido una buena comprensión de ciertos conceptos básicos que ellos puedan definir operacionalmente y vincular de manera significativa a principios importantes. Los estudiantes deberían haberse familiarizado con representaciones formales (diagramas, gráficas, ecuaciones, etc.) y ser capaces de descubrir en detalle las relaciones entre un concepto y el formalismo que es usado para representarlo. Ellos deberían ser competentes en razonamientos propios del trabajo científico tales como el razonamiento proporcional, analógico y basado en modelos, para aplicar los conceptos y representaciones de física en el análisis e interpretación de fenómenos simples. Los estudiantes deberían ser capaces de hacer explícita la correspondencia entre un concepto o una representación y un objeto real o evento en el mundo real. Por supuesto, también es necesario que los estudiantes en un curso introductorio aprendan

cómo solucionar problemas de física evitando la tendencia a concentrarse en algoritmos más que en el tema mismo. Aun así, la bibliografía muestra evidencia que indica que para muchos estudiantes los cursos introductorios estándar no son efectivos en ayudar a alcanzar la clase de objetivos de enseñanza enunciados. La facilidad en usar vocabulario no indica comprensión conceptual. La habilidad para seguir ciertos procedimientos prescritos para solucionar problemas estándar no indica desarrollo de habilidades de razonamiento científico (Chabay y Sherwood 2006, Viennot 2002).

Muchas dificultades de los estudiantes surgen cuando lo que el profesor dice o supone y lo que los estudiantes interpretan o suponen como dicho por el profesor no es lo mismo. Frecuentemente hay diferencias significativas entre lo que el profesor piensa que los estudiantes han aprendido en un curso de física y lo que los estudiantes pueden realmente haber aprendido.

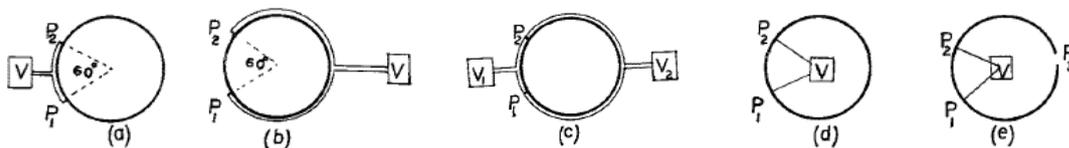
La indagación acerca de la comprensión de los estudiantes contribuye en la construcción de una investigación base que puede ser usada para guiar el desarrollo de currículos que relacionen las necesidades y las habilidades de los estudiantes con los objetivos de enseñanza; teniendo en cuenta que un currículo apropiadamente debe incluir no sólo el contenido a ser enseñado sino también la manera en la cual éste se enseña (McDermott 1991). Asimismo, debe proporcionar un puente entre el estudio de la física y el uso de la física.

### **1.1.1 Estado del tema en la Enseñanza de la Física: Dificultades de enseñanza-aprendizaje en estudios sobre el concepto de fuerza electromotriz - fem**

El concepto de fuerza electromotriz ha sido tratado en diversos artículos de revistas científicas, tanto de física como de enseñanza de la física. A continuación se presentan aquellas referencias que enuncian dificultades de enseñanza-aprendizaje de este concepto.

Phillips (1963) afirma que existen sutiles malentendidos en relación al concepto de fuerza electromotriz, no sólo porque el término es un nombre inapropiado sino porque los fenómenos mismos parecen más difíciles de entender cuanto más cerca se analizan. Para propiciar la reflexión acerca del significado de los

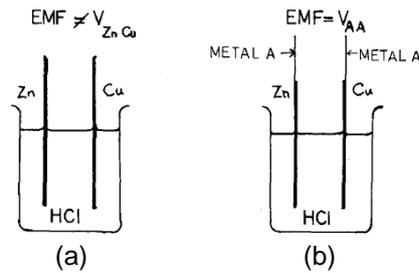
conceptos de fem y diferencia de potencial, hace un análisis macroscópico de la lectura de uno o dos voltímetros conectados a un anillo metálico, en la siguiente situación: Se tiene flujo magnético a través de un anillo de cobre. El flujo se incrementa a tal velocidad que se genera una corriente de 10 A en el anillo. La resistencia del anillo es de  $1/10 \Omega$ . Se asume que no hay flujo fuera del anillo y que el flujo es perpendicular al plano del anillo. La corriente está en el sentido de las manecillas del reloj alrededor del anillo, y es constante por un periodo bastante largo permitiendo usar voltímetros como en un circuito DC (ver figura 1.1). En todos los casos se pregunta ¿cuál es la lectura del voltímetro?, ¿existen dos o más casos en los que coincide la lectura? ¿La polaridad siempre es la misma o varía?



**Fig. 1.1** Anillo de cobre en el que se definen dos puntos  $P_1$  y  $P_2$  separados un ángulo de  $60^\circ$ . En (a), (b), (d) y (e) se conecta un voltímetro como se muestra. En (c) se conectan dos voltímetros idénticos. En (e) el anillo tiene un corte en el punto  $P_3$ .

El análisis de Phillips muestra que para predecir la lectura del voltímetro entre los puntos  $P_1$  y  $P_2$  se requiere conocer exactamente que borne del voltímetro (+ o -) está conectado a cada punto en relación al cambio de flujo. También se muestra que el concepto de diferencia de potencial no aplica a puntos sobre el anillo de cobre, porque en esta situación no se tienen campos eléctricos conservativos.

Fisher y Varney (1976) señalan que la fuerza electromotriz de una celda electroquímica algunas veces se define de manera imprecisa, como la diferencia de potencial entre los terminales, en equilibrio y sin que haya flujo de corriente eléctrica. Esta definición podría llevar a un lector a imaginar la situación mostrada en la figura 1.2(a) y la fem de esta celda como la diferencia de potencial entre el zinc y el cobre. Sin embargo, está no es la definición correcta de fem. La definición de fem es la diferencia de potencial en circuito abierto entre dos pedazos del mismo metal unidos a los electrodos de la celda, como muestra la figura 1.1(b).



**Fig. 1.2 (a) La fem de esta celda no es la diferencia de potencial entre el zinc y el cobre. (b) La fem de esta celda es definida como la diferencia de potencial entre dos pedazos del mismo metal unido a los dos electrodos.**

Posiblemente, lo anterior, no se señala debido a que el procedimiento de medida suele dar la medida correcta indicada en la figura 1.2(b); ya sea que el experimentador conozca o no la precisión indicada.

Page (1977) afirma que diversas revistas y diccionarios técnicos no presentan uniformidad con respecto al uso de los términos fuerza electromotriz, diferencia de potencial y voltaje. El uso del término fuerza electromotriz algunas veces es menospreciada, mientras que otras veces es considerado sinónimo ya sea de voltaje o de diferencia de potencial. Los tres términos están relacionados con diferentes aspectos de fenómenos eléctricos.

Varney y Fisher (1980) examinaron más de un centenar de referencias en las cuales se menciona el término fem. Agruparon en cuatro categorías las dificultades encontradas y relacionadas con la comprensión del concepto de fuerza electromotriz.

- Un grupo recoge las definiciones de fem basadas en la idea de que es la causa de las diferencias de potencial terminal en los bornes de una batería. Estas referencias fallan al no exponer que la fem es una acción no electrostática. Muchos afirman que la diferencia de potencial es la fem. En este sentido Varney y Fisher comentan que, en general, las introducciones al estudio de la teoría electromagnética, y en particular de la electricidad, en cualquier nivel de educación, comúnmente comienzan con la electrostática discutiendo con cierta amplitud la interacción de partículas cargadas, pero raramente se menciona la existencia de acciones no conservativas y menos

aun tratadas en detalle. Esta ausencia parece extraña si se tiene en cuenta que las acciones no conservativas son indispensables para la observación de todos los fenómenos de electricidad, incluidos los fenómenos electrostáticos. Por ejemplo, una varilla de vidrio o de caucho nunca se podría cargar sin la acción de fuerzas no conservativas ejercidas al alejar la tela con la que se ha frotado la varilla. Ni se podría usar un generador de Van de Graff sin el motor o una persona que gire la manivela para mover la banda de caucho.

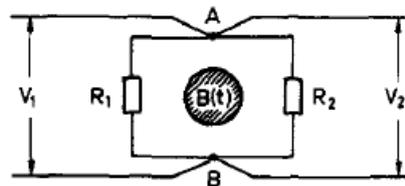
- Un segundo grupo se consideran las definiciones basadas en tener una batería u otra fuente de fem impulsando una corriente continua alrededor de un circuito resistivo simple, con lo cual la fem de la batería (o fuente) está dada por  $P/i$ , donde  $P$  es la potencia desarrollada en la resistencia total del circuito, incluyendo la fuente, e  $i$  es la corriente. Este tipo de definición, en principio, no es incorrecta ya que lleva en algunos casos a un procedimiento de trabajo (casi) experimental para medir fem. Pero, la potencia disipada en la fuente misma no es medida y podría ser encubierta por el calor de la reacción. Esta definición coloca el énfasis en la palabra “motriz” como parte del término fuerza electromotriz requiriendo que la fem conduzca una corriente alrededor de un circuito. Sin embargo, esta definición no es generalizable a todos los casos. No se puede aplicar al caso de la fem generada por piezoelectricidad, contactos bimetálicos, y fenómenos relacionados; es inapropiada en experimentos y fenómenos de circuito abierto. Además, algunas referencias en esta categoría acoplan la definición con una imagen de que la fem causa y sostiene una diferencia de potencial, y la diferencia de potencial impulsa la carga alrededor del circuito. Esta definición debe ir acompañada de su campo de validez ya que hay situaciones en las que no se cumple. Por ejemplo, un anillo resistivo con un flujo magnético cambiando a través de él experimenta una fem inducida distribuida a través de todo el resistor. Sin embargo, en este caso la fem impulsa la corriente alrededor del anillo pero no produce diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera del anillo.

- Otra categoría agrupa las definiciones que toman la forma  $\varepsilon_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$ . En este tipo de definición,  $\vec{E}$  es presentado como “el campo eléctrico”, y algunas veces se especifica que es un campo no conservativo. Un ejemplo de este modo de definir fem aparece en Maxwell (1873).
- La última categoría, propuesta por estos autores, aborda la definición común en los textos elementales de que la fem es el trabajo necesario para llevar una unidad de carga una vez alrededor de un circuito simple que consiste de una fuente fem, como una batería, y un resistor conectado a los terminales de la batería. Esta definición parece ser un intento por explicar la noción de fem basada en la definición  $\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$ , en términos comprensibles para principiantes que todavía no están familiarizados con el cálculo. También es un intento por moverse con los procedimientos de la electrostática, donde (por lo menos conceptualmente) una carga de prueba es llevada en el vacío alrededor de cuerpos cargados de un punto a otro y el trabajo requerido se determina. Sin embargo, cuando se aplica la definición de “trabajo” para llevar la carga de prueba a través de medios sólidos o líquidos en lugar del vacío, y sin la definición de integral como guía, se encuentran dificultades con respecto a algunos puntos de procedimiento que necesitan ser explicados. Por ejemplo, ¿qué pasa con el trabajo hecho contra la resistencia? ¿Puede ser reducido a cero moviendo la carga de prueba con rapidez constante? ¿Cómo debe estar formada la carga de prueba? ¿Puede ser una carga puntual o debe estar en un anillo uniforme distribuida toda alrededor del circuito? ¿La carga de prueba es parte de la corriente que fluye en el circuito impulsada por la fem? o ¿es una carga extra llevada y movida por algún operador externo? Definir una magnitud como fem por tal experimento mental a menudo es aceptable pero el experimento debe contener todas las direcciones necesarias y no sufrir omisiones críticas o equivocaciones, que la hagan inapropiada para estudiantes principiantes.

Klein (1981) presenta un problema teórico y experimental, que se abordaba como un ejercicio en un curso básico de electrodinámica. Su análisis permite evidenciar las dificultades en el proceso de profundizar en la comprensión de las nociones de fem, diferencia de potencial, la naturaleza de la medida

proporcionada por un voltímetro (voltaje) y la aplicabilidad de la ley de Ohm. El problema consiste en lo siguiente: Imagine una caja negra con dos electrodos que sobresalen A y B, en los lados opuestos. La caja está sobre una mesa y un experimentador se ubica de un lado de la mesa y mide con un voltímetro un voltaje entre A y B, por ejemplo de 1V. Él camina alrededor de la mesa y se ubica en el lado opuesto de la caja y mide el voltaje entre los mismos puntos, pero esta vez mide 0,1V. Esto parece una paradoja física; pero en física nunca hay una paradoja real porque sólo hay una respuesta correcta.

El problema planteado como un ejercicio sería: Considere una espira metálica con dos resistores  $R_1$  y  $R_2$  y un campo magnético variable en su interior. Si se mide el voltaje  $V_1$  y  $V_2$  como indica la figura 1.3, los resultados son diferentes ¿Cómo explicar esto? ¿Los valores medidos corresponden a la fem inducida? O ¿corresponden a la diferencia de potencial entre A y B? ¿Qué significa medir el voltaje?



**Fig. 1.3 Circuito con dos resistores y un campo magnético variable dentro del área sombreada. (Tomado de Klein 1981, p. 603)**

Reif (1982) aborda el problema propuesto por Klein (1981) y plantea que muchos estudiantes, y aun físicos profesionales, tienden a confundir las nociones de diferencia de potencial, fem, la aplicabilidad de la ley de Ohm, y la naturaleza de la medida proporcionada por un voltímetro. También afirma que muchos libros de texto hacen poco por evitar tales confusiones.

Romer (1982) también considerando el problema propuesto por Klein (1981) (ver figura 1.3) se pregunta ¿qué mide un voltímetro? A la pregunta ¿cuáles serán los valores de  $V_1$  y  $V_2$ ? enuncia algunas respuestas erróneas que con frecuencia se ofrecen cuando se plantea el problema. “Si el terminal positivo de ambos medidores está conectado al punto A y el negativo al punto B, entonces ambos miden lo mismo” o “Quizás las dos medidas son diferentes si las resistencias son diferentes ( $R_1 \neq R_2$ ), pero si son iguales los dos valores  $V_1$  y  $V_2$

deben ser iguales”. La solución teórica de Romer es que  $V_1$  y  $V_2$  siempre son de signo opuesto y por lo tanto nunca son iguales. Aunque si las resistencias son iguales ( $R_1 = R_2$ ) entonces  $V_1$  y  $V_2$  son de igual magnitud. En general, la lectura de un voltímetro es igual a la integral de línea del campo eléctrico  $\vec{E}$ ,  $\int \vec{E} \cdot d\vec{l}$ , donde el camino de integración pasa a través del aparato comenzando en el cable conectado al terminal positivo y terminando en el cable conectado al terminal negativo. El campo  $\vec{E}$  puede ser conservativo o no conservativo. También describe un experimento que permite corroborar que las predicciones que se pueden hacer con el resultado anterior son casi exactas.

El artículo crítica que el análisis de Klein (1981) ignora la cuestión de los signos de la lectura del voltímetro. Enfoca el problema desde las ecuaciones de Maxwell, la geometría y topología de la situación física, y las propiedades elementales de los campos vectoriales y sus integrales de línea.

El análisis cuidadoso de la situación planteada también puede ayudar a clarificar cuestiones como: ¿qué significan los signos más y menos en un voltímetro?, ¿qué diferencia los conceptos de potencial, fem y voltaje?, qué sentido tiene la pregunta ¿dónde está localizada la fem?, etc. Asimismo, permite pensar otra pregunta que Romer deja planteada: En cualquier libro de física introductoria se afirma que “el voltaje a través de un inductor es  $V_L = L(dI/dt)$ ”. La esencia de un inductor es que contiene regiones en las cuales  $\partial\vec{B}/\partial t \neq 0$  y por tanto  $\nabla \times \vec{E} \neq 0$ , lo que implica que no se puede definir un potencial escalar para  $\vec{E}$  y seguramente genera dudas acerca del significado de las nociones de fem, voltaje y potencial. Entonces, ¿qué significa escribir  $V_L = L(dI/dt)$ ?

Cohen, Eylon y Ganiel (1983) basados en su experiencia en la enseñanza de la electricidad afirman que aun después de un estudio sistemático y bastante avanzado, en el cual los estudiantes se vuelven bastante eficientes en el uso de algoritmos complicados, ellos son incapaces de analizar cualitativamente circuitos simples. En particular, una batería con frecuencia es considerada como una fuente de corriente constante más que una fuente de voltaje con un valor de fem específico.

Peters (1984) analiza la misma pregunta que Reif (1982) y Romer (1982) ¿qué mide un voltímetro en un circuito que contiene una fem inducida? Pero, considera que las respuestas de ellos, probablemente no son muy intuitivas para estudiantes que enfrentan esta situación por primera vez. Así, presenta una serie de problemas que les permiten a los estudiantes examinar el rol de una fem inducida en un circuito, a un nivel más elemental. Supone que es necesario darles a los estudiantes una variedad de situaciones que los confronten y así puedan inferir propiedades generales de un circuito.

Usando baterías y bombillas explora el rol de una fem inducida en diferentes circuitos. Un primer grupo de cuestiones propone comparar el brillo de dos o más bombillas conectadas en serie alrededor de un solenoide que induce una fem constante. El segundo grupo de preguntas se enfoca en el rol espacial que una fem inducida juega en un circuito, enfatizando la importancia de la topología del circuito (diferente del caso ordinario de circuitos DC, los cuales se pueden deformar de cualquier manera pero manteniendo el orden de los elementos). Y, por último, propone un grupo de preguntas acerca del circuito usado en las primeras cuestiones, pero con una batería añadida, ya sea en serie o en paralelo a las bombillas (hay diferentes modos de conectar la batería al circuito: La batería se puede situar a la derecha o a la izquierda del circuito, su orientación puede variar, los alambres pueden hacer un lazo completo alrededor del solenoide, etc). Con estos últimos circuitos se consideran los efectos de la dirección de la corriente, del sentido de la fem inducida y de los signos de las diferencias de potencial.

El artículo define el concepto de fem en cada una de las situaciones experimentales propuestas y concluye que para estudiantes universitarios este concepto supone considerable dificultad en relación a su rol en circuitos eléctricos simples.

Rose-Innes (1985) afirma que los estudiantes cuando abordan circuitos eléctricos, con frecuencia tienen dificultad en entender la distinción entre diferencia de potencial y fuerza electromotriz. Sugiere que usualmente esta dificultad surge de una comprensión equivocada de la naturaleza de la fem más que de una dificultad en entender la naturaleza de la diferencia de potencial.

Haertel (1987) plantea tres dificultades que limitan seriamente el desarrollo del razonamiento cualitativo al analizar el papel de una fuente fem en el comportamiento de un circuito eléctrico. En primer lugar, el conocimiento acerca del cambio se suele abordar mediante el estudio acerca de una serie de estados de equilibrio. La mayoría de los problemas tratados en electrostática y en circuitos de corriente DC, son estáticos o cuasi-estáticos. Es decir, la distribución de los transportadores de carga o es estática o es estacionaria. La ley de Coulomb y las leyes de Kirchhoff sólo describen estos estados de equilibrio. Estas leyes no consideran cómo cambia el sistema de un estado a otro, o cómo se alcanza un nuevo estado de equilibrio. Ellas no son válidas durante el intervalo de tiempo que se da el cambio. Por lo tanto, el razonamiento cualitativo basado en estas ecuaciones está limitado a casos estáticos y no puede hacer frente con los cambios en el tiempo.

El cambio de corriente eléctrica en un circuito eléctrico debido a un cambio de la fem, se inicia en un cierto punto del circuito, y este cambio se tiene que extender alrededor de todo el sistema. El tiempo que toma este proceso más bien es corto y se puede despreciar al hacer un análisis cuantitativo. Sin embargo, para hacer un análisis cualitativo es importante conocer cómo se inicia este cambio de la corriente, cómo se transmite, y qué mecanismo determina el nuevo estado de equilibrio. Es de notar que este cambio no ocurre simultáneamente para todos los puntos del sistema, ya que no hay acción a distancia instantánea. Las leyes de Ohm y de Kirchhoff no son apropiadas para hacer un razonamiento cualitativo acerca de este proceso.

En segundo lugar, en el análisis del comportamiento de un circuito y que también dificulta la comprensión del concepto de fem, es la tendencia a razonar secuencialmente y localmente, más que holísticamente. Cuando se presenta un cambio en un circuito los estudiantes con frecuencia enfocan su atención únicamente en el punto donde ocurre el cambio, no reconocen que un cambio hecho en un punto en un circuito puede dar lugar a cambios en otros puntos. Los estudiantes suelen pensar un circuito cualquiera como compuesto de componentes aislados que pueden ser analizados independientemente uno del

otro, o como conformado de componentes que puedan ser analizadas una después de otra en secuencia alrededor del circuito.

En tercer lugar, para analizar cualitativamente un circuito es importante considerar la relación entre los enfoques teóricos macroscópico y microscópico. Un aspecto que caracteriza el nivel microscópico del electromagnetismo se basa en el estudio de los electrones, su movimiento, y su interacción con la materia. Aunque debería ser posible establecer una relación estrecha entre los efectos macroscópicos y microscópicos, tal vínculo se suele presentar a los estudiantes con bastantes inconsistencias. Por ejemplo, los conceptos de fem y diferencia de potencial eléctrico son tratados sin mantener la consistencia entre el nivel macroscópico y el microscópico. En el caso de la fem a nivel microscópico se relaciona con el trabajo hecho para separar cargas, y así explicar la energía eléctrica que aparece en la definición de fem. Por otro lado, la diferencia de potencial a nivel microscópico también se relaciona con energía eléctrica. Si no se precisa en cada caso cómo es la relación con la energía, las inconsistencias generadas dificultan el acceso de los estudiantes a la práctica del razonamiento cualitativo. Además, si se tiene una corriente constante en un circuito, desde el punto de vista microscópico, para dos áreas de sección transversal antes y después de un resistor la situación es idéntica. Es decir, la velocidad de arrastre a través de estas dos secciones transversales es la misma; y asimismo el campo. Desde el punto de vista macroscópico, entre estas dos secciones transversales hay una caída de potencial eléctrico; pero no se suele presentar una explicación a nivel microscópico de este hecho. Entonces, por un lado no hay diferencia microscópica entre estas dos secciones transversales, de acuerdo con el modelo para la corriente eléctrica; pero si se considera la caída de potencial si hay diferencia.

Roche (1987) hace notar que el término fuerza electromotriz fue introducido en los inicios del siglo XIX para describir el “primer movimiento” responsable de mantener una corriente eléctrica en un circuito de conductores. Pero, hoy día este término significa la diferencia de potencial a través del “prime mover” (motor de impulsión). Actualmente, las teorías físicas distinguen claramente entre “fuerza” y “diferencia de potencial”. Sugiere que es poco probable, que el

conflicto entre el significado aparente y el significado pretendido se resuelva por sí mismo, debido al poder sugestivo del lenguaje. Sin embargo, la abreviatura fem disminuye el problema considerablemente al eliminar explícitamente la referencia al término “fuerza”. En el caso de los estudiantes, quienes difícilmente conocen los orígenes históricos y el estado actual del concepto de fem, pueden ser incapaces de organizar una imagen coherente de este concepto. En este mismo sentido se pronuncian Legault y Peschard (2001) que recogen la disconformidad de diferentes estudios sobre el nombre de fuerza electromotriz.

Roche menciona que en muchos libros de texto se afirma que el cambio de flujo magnético a través de un circuito “causa” la fuerza electromotriz inducida. Esta afirmación no es compatible con la teoría electromagnética actual. Esta afirmación viene confirmada por los estudios posteriores de Jefimenko (2004) y de Hill (2010). En la teoría actual, la fem inducida en un embobinado estacionario en todos los casos es causada por un campo eléctrico inducido que es producido simultáneamente con el campo magnético por el movimiento de electrones fuente. Sin embargo, no hay duda que el cambio de flujo magnético usualmente es el modo más conveniente de inferir la existencia de, y de calcular, la fem inducida en un embobinado.

Roche indica que en el caso de un conductor moviéndose en un campo magnético estacionario, la fem de movimiento inducida es debida a una fuerza magnética sobre los electrones libres. En este caso, no se induce un campo eléctrico no conservativo. Con el análisis de este experimento pretende subrayar el hecho, frecuentemente obviado en los libros de texto, de que no siempre que hay inducción electromagnética se induce un campo eléctrico no conservativo.

McDermott y Shaffer (1992) presentan el trabajo del grupo “The Physics Education Group” de la Universidad de Washington que ha examinado las dificultades de los estudiantes al estudiar circuitos eléctricos simples formados únicamente por baterías y elementos resistivos. Algunos de sus hallazgos relacionados con las dificultades que se presentan en el proceso de comprensión del concepto de fem en el contexto de circuitos simples son:

- Muchos estudiantes frecuentemente se refieren a corriente, voltaje, energía y potencia de manera inapropiada y algunas veces intercambiamente. Aunque muchos estudiantes sean capaces de enunciar las definiciones de estos conceptos y de manipular los símbolos algebraicos usados para representarlos, con frecuencia no pueden relacionar los conceptos entre sí o aplicarlos a circuitos reales.
- Los estudiantes raramente, por su iniciativa, sintetizan los conceptos básicos de corriente, voltaje y resistencia en un modelo que puedan usar para predecir el efecto en un circuito de un cambio de un elemento. La falta de un modelo conceptual hace difícil ganar profundidad en la naturaleza de un modelo científico: esto es, cómo puede ser construido, cómo se puede usar, y cuáles son sus limitaciones (McDermott 1991).
- Si se considera que la fem caracteriza una batería, una dificultad para relacionar adecuadamente el concepto de fem con el de corriente eléctrica, en el contexto de circuitos eléctricos, subyace en la creencia común de que la corriente es “usada”. El lenguaje empleado por muchos estudiantes sugiere que ellos piensan que la corriente se produce constantemente en la batería y es “usada” por los elementos del circuito. Suponer que la batería es una fuente de corriente constante (es decir, la corriente a través de una batería siempre tiene el mismo valor) y es independiente del resto del circuito, implica pasar por alto el rol crítico jugado por la resistencia en la determinación de la corriente. Aun para buenos estudiantes la enseñanza tradicional parece ser poco efectiva para alterar la aparentemente idea intuitiva de que la batería produce una corriente constante.

Lanzara y Zangara (1995) hacen notar que los estudiantes desde la secundaria hasta el nivel universitario, desde el comienzo del estudio del electromagnetismo, se les presentan los conceptos de diferencia de potencial ( $\Delta V_{ab}$ ) y fuerza electromotriz ( $\varepsilon_{ab}$ ) entre dos puntos  $a$  y  $b$ . El primero está relacionado con un campo eléctrico conservativo y el segundo con un campo eléctrico no conservativo. Con frecuencia los estudiantes no son capaces de apreciar las diferencias entre estos dos conceptos. Además, ellos tienden a suponer que un voltímetro mide la diferencia de potencial entre los puntos  $a$  los

cuales está conectado. Aunque esta idea puede ser apropiada en muchas situaciones, puede realmente ser equivocada en situaciones que involucran el fenómeno de inducción electromagnética.

Montgomery (1999) describe la teoría de inducción unipolar sin invocar argumentos relativistas. Para los estudiantes es un fenómeno desconcertante, en parte porque el flujo magnético ligado al circuito es constante en el tiempo. Ellos pueden pensar que si el flujo es constante entonces no hay fem inducida. Así, calcula la fem inducida definiéndola previamente como la cantidad de energía mecánica convertida en energía eléctrica por coulomb de carga que circula. Es decir, sugiere que la fem se defina en términos de energía transferida y no como  $\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$  ( $\phi_B$ : flujo magnético). Por ejemplo, la fem de una celda química es la cantidad de energía química convertida en energía eléctrica por coulomb que circule; la misma definición se adecua para un generador eléctrico.

Legault y Peschard (2001) afirman que la expresión “fuerza electromotriz” es incorrecta. Citan varios ejemplos de libros de texto que coinciden en esta afirmación. En particular, consideran que este término propicia la confusión entre fuerza y energía. Algunos autores que ellos citan sugieren que es mejor usar la abreviación fem, pero Legault y Peschard proponen reemplazar la expresión “fuerza electromotriz” por la expresión “potencial electromotriz (pem)”. Este término tiene la ventaja de estar en consonancia con la noción intuitiva de “ser capaz” de poner cargas en movimiento, y también desaparecería la incoherencia entre la expresión usada y la noción y las unidades a las cuales se refiere.

Pocoví y Hoyos (2004) presentan un estudio de caso, mediante entrevistas, acerca de las concepciones de dos alumnos universitarios avanzados y dos graduados en licenciatura en física acerca de los conceptos de diferencia de potencial y fuerza electromotriz. Los participantes se pueden considerar “expertos” en el sentido que todos han cursado y aprobado materias de electromagnetismo de nivel intermedio y alto. La entrevista fue diseñada con el propósito de revelar las características ontológicas de las concepciones de

diferencia de potencial y fem de los entrevistados, teniendo como referencia la teoría de categorizaciones ontológicas de los conceptos presentada por Chi et al. (1994). Por ejemplo, en una de las respuestas a la pregunta qué es la fem se le identifica con la presencia de cargas positivas y negativas en los bornes de una batería. Es decir, se supone la fem en la misma categoría ontológica que el concepto masa. En varias respuestas se considera que los conceptos de diferencia de potencial y fem son equivalentes, sin tener en cuenta que el primer concepto está relacionado con un campo conservativo mientras que el segundo no. Pocovi y Hoyos concluyen que un alto grado de formalización no implica conocer la naturaleza ontológica de los conceptos y fenómenos relacionados.

Jefimenko (2004) define una ecuación causal como aquella que relaciona una magnitud que representa un efecto con una o más magnitudes que representan la causa de este efecto. Estas ecuaciones son gobernadas por el principio de causalidad. De acuerdo a este principio, todos los fenómenos están determinados exclusivamente por eventos pasados. Entonces, una ecuación entre dos o más magnitudes simultáneas en el tiempo y separadas en el espacio (o no separadas en el espacio) no puede representar una relación causal entre estas magnitudes. La causa debe preceder su efecto. En este sentido, la ley de inducción de Faraday no representa una relación causa-efecto. En el fenómeno de inducción electromagnética se induce una fem que *es medida por, y no causada por*, el cambio del flujo magnético.

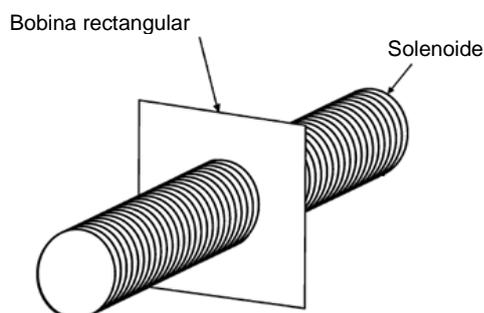
Galili, Kaplan y Lehavi (2006) revisaron cerca de treinta libros de texto para cursos introductorios de física a nivel universitario, publicados entre 1995 y 2005. Basados en esta revisión, a propósito de la fem de movimiento, sostienen que la idea de cambio de área y cambio de orientación usada en muchos libros de texto debe ser refinada para reducir la confusión. También determinaron que la mayoría presenta el fenómeno de inducción electromagnética comenzando con fem de transformación (fem inducida causada por variación del campo magnético) y en un apartado posterior presentan la fem de movimiento (fem inducida causada por el movimiento de un conductor en un campo magnético constante). En este sentido, enfatizan

que la forma integral de la ley de Faraday incluye todos los casos de fem inducida, tanto fem de transformación como fem de movimiento. Es posible presentar adecuadamente conceptos relativistas de modo cualitativo, en cursos introductorios de electromagnetismo. Así se puede demostrar, mediante un ejemplo sencillo, que la distinción entre los dos tipos de fem no es absoluta. La fem de movimiento detectada por un observador inercial puede ser detectada como una fem de transformación para otro observador inercial.

Guisasola, Montero y Fernandez (2008) basados en la historia de las ciencias abordan las siguientes preguntas: ¿cuál es el problema que está en el origen del concepto de fuerza electromotriz?, y ¿cuáles son los conocimientos que los estudiantes deben conocer para entender el funcionamiento de una pila en un circuito de corriente continua? En este marco, formulan cinco indicadores de aprendizaje del concepto de fem, que indican los diferentes estadios que se deben trabajar en una secuencia de enseñanza pensada para ser aplicada a alumnos de secundaria. Y enuncian algunas dificultades de aprendizaje de los estudiantes en relación con el concepto de fem: (i) Por lo general no se concibe la fem como una acción no electrostática y no conservativa que da lugar a la separación de cargas de distinto signo en una pila; lo que implica no distinguir los conceptos de fem y diferencia de potencial. Y (ii) Se suele asociar la fem con una propiedad de las cargas eléctricas.

Thong y Gunstone (2008) a partir de una serie de entrevistas realizadas a estudiantes de nivel universitario de segundo año de física, abordan sus concepciones acerca del origen de la fem inducida. Partiendo del estudio de Peters (1984) proponen cuatro preguntas relacionadas con un montaje básico de una bobina conductora rectangular alrededor de un solenoide muy largo (ver figura 1.4). El campo magnético está confinado dentro del solenoide. La bobina contiene bombillas como componentes del circuito. A los estudiantes se les pide predecir que bombillas conectadas a la bobina podrían iluminar, y sus brillos relativos. Establecen dos concepciones alternativas de los estudiantes respecto a la fem inducida: (i) Suponen que siempre debe haber contacto entre el flujo magnético y la bobina externa para que se induzca una fem en la

bobina. (ii) Consideran que la diferencia de potencial en un campo electrostático es lo mismo que la fem inducida en un campo eléctrico inducido.



**Fig. 1.4 Montaje básico para las preguntas propuestas en las entrevistas.**

Gunstone, Mulhall y McKittrick (2009) como parte de un proyecto para desarrollar una mejor comprensión del tema de circuitos eléctricos DC, entrevistaron once profesores de física de secundaria con bastante experiencia, en una ciudad de Australia. Tres de ellos autores de libros de texto de física para este nivel de formación. Con las entrevistas se pretendía obtener información relevante a preguntas como: (i) ¿Cuáles son los conceptos centrales de la temática de circuitos DC entendidos y representados por los profesores?, (ii) ¿Qué modelos/analogías/metáforas son usadas para los conceptos relacionados con la temática de circuitos DC, por los profesores?, y ¿cuáles con sus justificaciones para adoptarlos? El protocolo de entrevista se dividía en tres secciones. En una de ellas, con el propósito de conocer la comprensión de los profesores acerca de los conceptos de voltaje, diferencia de potencial, caída de voltaje, fuerza electromotriz y energía eléctrica; se hacían preguntas relacionadas con un circuito DC que contenía una batería, un interruptor y una o dos bombillas. Algunas respuestas acerca de la comprensión de estos conceptos fueron claramente inadecuadas; por ejemplo:

- Voltaje es la energía usada por el circuito. Voltaje y diferencia de potencial es lo mismo.
- Fuerza electromotriz es la energía dada a las cargas para conducir las alrededor del circuito.
- Fem es la fuerza electromotriz, entonces es la fuerza que conduce las cargas alrededor del circuito.

- Si se dice que una batería es de 12 V, eso significa que de un lado al otro hay una caída de voltaje de 12 V.

Gunstone et al. creen que una valoración generosa de la comprensión que tienen la mayoría de los profesores entrevistados; de los conceptos de voltaje, diferencia de potencial y fuerza electromotriz, es que es deficiente e incierta. Otro ejemplo de esto último es que ningún profesor consideró el por qué la fuente de energía en circuitos eléctricos tiene como descriptor joule/coulomb y no joule.

Guisasola, Almudi y Zuza (2011) en un estudio que examina la comprensión del fenómeno de inducción electromagnética en estudiantes tanto de ingeniería como de ciencias físicas, destacan que el análisis de la fem producida por un generador homopolar, un disco de Faraday, y dispositivos similares genera dificultades. En general, hay un modesto número de estudios de los problemas asociados con el aprendizaje de la fem inducida. Algunos de esos estudios muestran que muchos estudiantes no reconocen las condiciones requeridas para generar fem inducida en situaciones simples de inducción electromagnética. Dos de los objetivos de la investigación que presentan era establecer si los estudiantes entendían (i) el concepto de fem de movimiento y que (ii) un campo magnético variando en el tiempo induce una fem. Diseñaron y aplicaron un cuestionario a 138 estudiantes de la Universidad del País Vasco, después que ellos habían estudiado el tema en clase. También entrevistaron a 12 estudiantes para comprender mejor como razonan sus respuestas en el cuestionario. Un porcentaje significativo de las respuestas revelan confusión respecto al rol jugado por el campo magnético en la producción de la fem inducida; por ejemplo, muchos estudiantes consideran que la fem inducida se debe a la presencia de un campo magnético uniforme.

Para finalizar este apartado, en la tabla 1.1 se presenta un resumen de los artículos revisados y de las dificultades en el proceso enseñanza-aprendizaje del concepto de fuerza electromotriz:

**Tabla 1.1 Resumen de los artículos revisados**

AUTOR	DIFICULTADES
Phillips (1963)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuerza electromotriz es un nombre inapropiado.</li> <li>- Un voltímetro mide diferencia de potencial o fem.</li> </ul>
Fisher y Varney (1976)	<p>La fem de una celda electroquímica es la diferencia de potencial en circuito abierto entre dos pedazos del mismo metal unidos a los electrodos de la celda y no entre los electrodos.</p>
Page (1977)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En diferentes publicaciones no hay uniformidad con respecto al uso de los términos fem, diferencia de potencial y voltaje.</li> <li>- Algunas veces se menosprecia el término fem, y otras veces se considera sinónimo de diferencia de potencial o de voltaje.</li> </ul>
Varney y Fisher (1980)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se suele hacer explícito que la fem es una acción no electrostática.</li> <li>- Enfatizar la palabra motriz como parte de la expresión fuerza electromotriz se requiere que la fem mantenga una corriente eléctrica en un circuito; no se puede aplicar a fenómenos de circuito abierto.</li> <li>- En muchos casos se suele presentar <math>\varepsilon_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}</math> sin especificar que <math>\vec{E}</math> es un campo no conservativo.</li> <li>- Definir fem como trabajo por unidad de carga y aplicarla a medios sólidos o líquidos en lugar del vacío, suscita preguntas que no se suelen abordar.</li> </ul>
Klein (1981)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Existen dificultades de comprensión de las nociones de fem, diferencia de potencial y voltaje al considerar la naturaleza de la medida de un voltímetro y la aplicabilidad de la ley de Ohm.</li> </ul>
Reif (1982)	<p>Muchos libros hacen poco por evitar las confusiones entre las nociones de fem, diferencia de potencial y voltaje. Y muchos estudiantes y profesionales las consideran sinónimos.</p>
Romer (1982)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un voltímetro no siempre mide la misma magnitud.</li> <li>- ¿Qué significan los signos + y – en la lectura de un voltímetro?</li> <li>- En el caso de un inductor, la expresión <math>V_L = L(di/dt)</math> es una fem, un voltaje o un potencial.</li> </ul>
Cohen, Eylon y Ganiel (1983)	<p>Se suele suponer que una batería es una fuente de corriente constante en lugar de una fuente de voltaje con un valor de fem específico.</p>
Peters (1984)	<p>Comprender el rol de la fem inducida en un circuito supone considerable dificultad para estudiantes universitarios.</p>
Rose-Innes (1985)	<p>Al analizar circuitos es más difícil comprender la naturaleza de la fem que la naturaleza de la diferencia de potencial.</p>
Haertel (1987)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se suele tener presente que el cambio de corriente en un circuito debido a un cambio de fem se inicia en un cierto punto de este y no se extiende de manera instantánea.</li> <li>- Para comprender el papel de la fem en un circuito es necesario razonar holísticamente más que</li> </ul>

	<p>secuencialmente y localmente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Al abordar los conceptos de diferencia de potencial y fem se suelen presentar inconsistencias entre una descripción macroscópica y una microscópica.</li> </ul>
Roche (1987)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El término “fuerza electromotriz” genera ambigüedades en su significado por incluir la palabra fuerza sin que realmente lo sea. Esta dificultad se debe al poder sugestivo del lenguaje.</li> <li>- No conocer los orígenes históricos y el estado actual del concepto de fem dificulta crear una imagen coherente del mismo.</li> <li>- Se suele afirmar que la causa de la fem inducida es el cambio de flujo magnético, pero esta afirmación no es compatible con la teoría electromagnética actual. El artículo afirma que el cambio de flujo es la medida de la fem.</li> </ul>
McDermott y Shaffer (1992)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A los estudiantes se les dificulta comprender los conceptos de corriente, voltaje, energía y potencia. Algunas veces los consideran sinónimos.</li> <li>- Los estudiantes tienen bastantes dificultades en sintetizar los conceptos corriente, voltaje y resistencia en un modelo.</li> <li>- Suelen suponer que la corriente se produce constantemente en la batería.</li> </ul>
Lanzara y Zangara (1995)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los estudiantes con frecuencia no son capaces de apreciar las diferencias entre los conceptos de diferencia de potencial y el de fem.</li> <li>- Tienden a suponer que un voltímetro siempre mide diferencias de potencial.</li> </ul>
Montgomery (1999)	<p>El fenómeno de inducción unipolar es desconcertante para los estudiantes porque aparentemente el flujo magnético no cambia y aun así se induce una fem.</p>
Legault y Peschard (2001)	<p>La expresión “fuerza electromotriz” propicia la confusión entre fuerza y energía.</p>
Pocoví y Hoyos (2004)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En algunos casos, se identifica la fem con la presencia de cargas positivas y negativas en los bornes de una batería, como si el concepto de fem fuese semejante ontológicamente al concepto de masa.</li> <li>- Se suele considerar que el concepto de diferencia de potencial es equivalente al concepto de fem.</li> </ul>
Jefimenko (2004)	<p>Se suele pensar que la fem inducida es causada por el cambio de flujo magnético.</p>
Galili, Kaplan y Lehavi (2006)	<p>Se tiende a suponer que la diferencia entre fem de transformación y fem de movimiento es absoluta. Sin tener en cuenta que la fem de movimiento detectado por un observador inercial puede parecer como una fem de transformación para otro observador.</p>
Guisasola, Montero y Fernandez (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se tiene dificultad en concebir la fem como una acción no electrostática.</li> <li>- No se distingue entre los conceptos de diferencia de potencial y de fem.</li> <li>- Se suele asociar la fem con una propiedad de las cargas eléctricas.</li> </ul>

Thong y Gunstone (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si se tiene un solenoide muy largo y una bobina alrededor de él, se suele suponer que siempre debe haber contacto entre el flujo magnético y la bobina externa para que se induzca una fem en la bobina.</li> <li>- Algunos estudiantes consideran que la diferencia de potencial en un campo electrostático es lo mismo que la fem inducida en un campo eléctrico inducido.</li> </ul>
Gunstone, Mulhall y McKittrick (2009)	<p>Algunos profesores creen que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fem es la energía dada a las cargas para conducir las alrededor del circuito.</li> <li>- Fem es la fuerza que conduce las cargas eléctricas alrededor del circuito.</li> <li>- Un valor específico de fem significa que entre los bornes de la batería hay una caída de voltaje de ese valor.</li> </ul>
Guisasola, Almudi y Zuza (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muchos estudiantes no reconocen las condiciones requeridas para generar fem inducida en situaciones simples de inducción electromagnética.</li> <li>- Existe confusión respecto al rol jugado por el campo magnético en la generación de la fem inducida.</li> </ul>

### 1.1.2 Preguntas que aborda esta investigación

Teniendo en consideración la revisión bibliográfica acerca de los problemas que surgen en el proceso de enseñanza-aprendizaje de distintos conceptos y temáticas de la teoría electromagnética (como: carga eléctrica, campo eléctrico, campo magnético, capacitancia, circuitos eléctricos, ley de Ampere y ley de inducción de Faraday), así como nuestra experiencia como profesores, y la consulta de bibliografía científica que explica dichos fenómenos, nos ha llevado a precisar más el problema que se quiere investigar.

Este trabajo se centra en el análisis de las dificultades de aprendizaje del concepto de fem tanto en el contexto de circuitos eléctricos DC como en el contexto del fenómeno de inducción electromagnética, de estudiantes de primer curso de titulaciones de Física e Ingeniería.

El trabajo se enfoca, en primer lugar, en el estudio del *conocimiento declarativo* (conocimiento sobre “qué sucede”) que tienen los estudiantes sobre los fenómenos cuya explicación involucra el concepto de fem. En segundo lugar, se pone el énfasis en el conocimiento explicativo (conocimiento sobre “por qué sucede”) de estos fenómenos. Es decir, este estudio no sólo pretende contrastar si los estudiantes aplican correctamente el concepto de fem en

situaciones que involucran circuitos DC y situaciones que involucran el fenómeno de inducción electromagnética, sino que también pretende analizar los razonamientos que realizan los estudiantes para justificar y validar dicha aplicación.

De acuerdo con lo anterior, las preguntas que aborda esta investigación son:

- (i) ¿Qué se entiende por una comprensión adecuada del concepto de fuerza electromotriz en cursos introductorios de física para estudiantes de ciencias e ingeniería?
- (ii) ¿Cuáles son las principales dificultades de estudiantes universitarios en el proceso de aprendizaje del significado del concepto de fuerza electromotriz?
- (iii) ¿Cómo se presenta el concepto de fuerza electromotriz en los libros de texto de cursos introductorios de física en la universidad?

## **1.2 ANÁLISIS EPISTEMOLÓGICO Y FORMULACIÓN ACTUAL DEL CONCEPTO DE FUERZA ELECTROMOTRIZ – fem**

La introducción de un concepto físico, como el de fem en nuestro caso, *no* es algo obvio, intrascendente y sin consecuencias. Ello presupone, muy por el contrario, una profunda elaboración que tiene consecuencias de interés básico en la interpretación fenomenológica del mundo.

Este apartado trata de dar respuesta a la primera pregunta de la investigación: ¿Qué se entiende por una comprensión adecuada del concepto de fuerza electromotriz en cursos introductorios de física para estudiantes de ciencias e ingeniería?

En primer lugar, se argumenta acerca del papel que juega la historia y la filosofía de la física tanto en el análisis como en la práctica de la enseñanza y aprendizaje de la física. Y, en segundo lugar, se aborda la evolución del concepto de fem desde su origen hasta el momento actual.

### **1.2.1 ¿En qué contribuye la historia y la filosofía de la Física en la enseñanza y aprendizaje de la Física?**

Para empezar vale la pena preguntarse ¿por qué considerar la historia y la epistemología de la Ciencia en la enseñanza-aprendizaje de la Física? Cuestión sobre la que se viene publicando desde 1893, año de la primera referencia disponible (Seroglou y Koumaras 2001).

Las teorías y los conceptos científicos no emergen milagrosamente por el contrario son el resultado de un arduo proceso de solucionar problemas y probar rigurosamente hipótesis iniciales (Nerssesian 1995). Un análisis detallado de acontecimientos históricos relacionados con la ciencia señalan que las ciencias son disciplinas en las cuales el cambio dinámico y las modificaciones son la regla más que la excepción (Thackray 1980). Citando a Kuhn: “Me sentí atraído... a la historia de la ciencia por una fascinación totalmente imprevista con la reconstrucción de antiguas ideas científicas y el proceso mediante el cual ellas se transformaron en unas más recientes” (1984, p. 31). Conocer cómo el desarrollo de ideas explicativas lleva al modelo científico actual puede proporcionar información importante para establecer objetivos de aprendizaje y para seleccionar conocimiento que apoye el diseño de secuencias de enseñanza (Wandersee 1992, Niaz 2008). La historia de la ciencia es un instrumento útil cuando se enseña Física, específicamente la teoría electromagnética de campos, para identificar dónde se encontraron problemas al construir sus conceptos y leyes, indicando qué barreras epistemológicas tuvieron que ser superadas y las ideas que generaron progreso, su contexto social y repercusiones tecnológicas desde el conocimiento alcanzado en el pasado hasta el momento actual (Furio et al. 2003).

El consenso actual afirma que la comprensión de conceptos y teorías no sólo requiere conocer el estado actual del conocimiento de un tema en particular, sino también conocer el modo en que ese conocimiento se ha desarrollado y pulido a través del tiempo (Wandersee 1992, Matthews 1994, Duschl 2000, McComas et al. 1998, Rudge y Howe 2004). Además, en las últimas décadas los estándares educativos (National Research Council 1996, European

Comisión 2007) proponen que se haga una presentación de los conceptos y teorías no sólo involucrando una perspectiva histórica sino también una introducción del significado de los conceptos y una representación apropiada del contexto social y científico que está en el origen de las ideas y soluciones claves.

La estructura de la ciencia, la naturaleza del método científico y la validación de los juicios científicos son algunas de las áreas en las cuales la historia y la epistemología de la ciencia pueden enriquecer la enseñanza de la ciencia. Hay muchos argumentos defendiendo la inclusión de la historia de la ciencia en el currículo, particularmente su integración en las estrategias de aprendizaje (Clough y Olson 2004, Izquierdo y Aduriz-Bravo 2003, Seroglou et al. 1998, Solomon 2002). Sin embargo, para que esta información sea útil en el diseño de secuencias didácticas se requiere que se lleve a cabo un estudio histórico y epistemológico de la ciencia con una “intencionalidad pedagógica” y conocimiento de las dificultades de los estudiantes cuando están en el proceso de aprender. Un estudio crítico de la historia y la epistemología de la ciencia (donde la historia sea vista como una fuente que muestra la solución de problemas que han significado avances en el conocimiento científico) es probable que informe a profesores e investigadores acerca de la presencia de saltos cualitativos en la evolución de un concepto (Nersessian 1989, Duschl 1994). Así, si los profesores e investigadores consideran estas “discontinuidades” entre significados de conceptos o de modelos, les pueden ayudar a clarificar, explicar y explorar conceptos físicos y a entender las dificultades en el aprendizaje de los estudiantes.

Así mismo, otra razón para utilizar la historia y la epistemología de la Física en su enseñanza es su contribución a un posible cambio de actitud más favorable de los estudiantes hacia el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física, siendo un punto notable en este propósito el no centrarse solamente en el contenido de la Física sino también abordar la Física como una actividad humana. Esto es coherente con el cambio consciente de la enseñanza de la ciencia como un cuerpo establecido de conocimientos hacia la percepción de la ciencia como un método para generar y validar tales conocimientos.

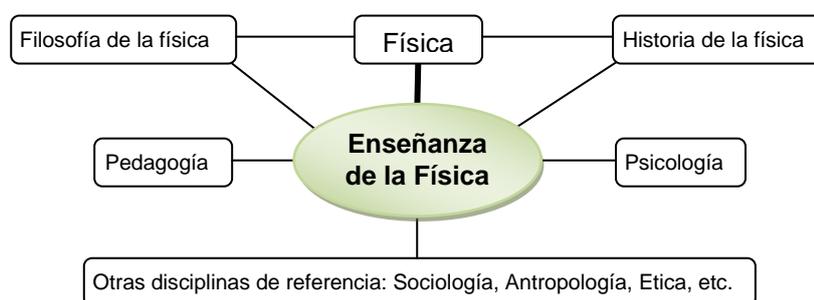
Desde los ochenta, la teoría constructivista del aprendizaje acoplada con la investigación de las ideas alternativas de los estudiantes ha resaltado la historia de la Física como una fuente de información fructífera que puede ayudar a los profesores a prever ideas alternativas de los estudiantes (Benseghir y Closset 1996). En aquellos casos donde los científicos presentaron argumentos y teorías contradictorias es posible, en ocasiones, anticipar las ideas alternativas de los estudiantes (Arons 1997). Actualmente el análisis de las concepciones de los estudiantes busca ir más allá de un simple catálogo de ideas “intuitivas” y busca una estructura interna en esas concepciones. Es más probable que este camino de análisis proporcione algunas pistas para crear estrategias de enseñanza-aprendizaje más eficaces (Saltiel y Viennot 1985). En este sentido, el uso de la historia de la ciencia puede orientar preguntas como ¿en qué periodo del desarrollo de la historia de la ciencia se ubica mejor el grupo de ideas alternativas que se estén considerando?, ¿qué se puede aprender, como profesores, de tal paralelismo?, ¿ayuda realmente a interpretar el nivel de comprensión de los estudiantes y a diseñar mejores estrategias de enseñanza? A propósito de esta última pregunta, es necesario tener presente que los contextos culturales son diferentes y no todas las características observadas en el razonamiento espontáneo de los estudiantes de hoy día se han dado en alguna etapa del desarrollo histórico de la Ciencia.

Como se ha justificado previamente, el estudio de la evolución histórica de una teoría o concepto en la Física puede ayudar a mejorar nuestra comprensión de estos. Algunas ideas de teorías ya superadas se mantienen explícita o implícitamente en la física actual, por ejemplo en el caso de la electrostática, en algunos textos la presentación de la ley de Coulomb induce a pensar la interacción eléctrica como acciones a distancia (Furió y Guisasola 2001, Arons 1970). Explicaciones convencionales o construcciones auxiliares se pueden haber vuelto tan familiares que pueden ocasionalmente ser erróneas para ser usadas en explicaciones físicas correctas; entendiendo explicaciones correctas como aquellas que están en concordancia con las teorías actuales. Como los estudiantes suelen no tener elementos suficientes para establecer los orígenes históricos y el estado actual de tales conceptos o teorías les es bastante difícil

elaborar por sí mismos una imagen o representación coherente de estos. La historia puede ayudar a clarificar tales problemas e incluso sugerir soluciones.

La comprensión de la interrelación entre ciencia-sociedad también es un factor esencial en la enseñanza de la Física, ya que el conocimiento científico y tecnológico está, en gran medida, culturalmente determinado y refleja las circunstancias sociales, religiosas, políticas, económicas y ambientales en las cuales la ciencia y la tecnología se llevan a cabo (Gil-Perez et al. 2005). Como los objetos y procesos tecnológicos se han vuelto parte de la vida diaria, lo que hace necesario propiciar una alfabetización tecnológica; en este sentido la historia de la invención de diferentes dispositivos (por ejemplo de comunicación) puede propiciar un vínculo entre la escuela y la tecnología de la vida diaria (Seroglou y Koumaras 2001).

En resumen, se puede afirmar que la investigación en la educación en física ciencias es de naturaleza interdisciplinaria. Existen varios “dominios de referencia” (Duit, Niedderer y Schecker 2008) que son necesarios para atender los desafíos de la investigación y análisis de la enseñanza y el aprendizaje de las teorías y conceptos de la física. La filosofía y la historia de la física proporcionan marcos que hacen posible identificar lo que usualmente se llama “naturaleza de la física” (McComas 1998). Pero también las ciencias sociales son dominios de referencia esenciales, especialmente la pedagogía y la psicología (ver figura 1.5).



**Fig. 1.5 Disciplinas de referencia de la Educación en Física**

De acuerdo a lo expuesto hasta aquí existen múltiples razones desde el punto de vista de la enseñanza-aprendizaje de la Física para hacer un análisis histórico-epistemológico de la evolución de las teorías y conceptos de la Física.

En consecuencia, a continuación se presenta un análisis histórico-epistemológico de la teoría electromagnética considerada como marco contextual del concepto de fuerza electromotriz-fem.

### **1.2.2 Evolución del concepto de fem desde su origen en el siglo XVIII hasta el momento actual**

Al analizar un concepto físico como por ejemplo el de fuerza electromotriz (o fem), es necesario tener en cuenta que el surgimiento de cualquier concepto responde a un proceso de discusión y reelaboración a partir de una problemática concreta que se presenta en un contexto de investigación con un marco referencial teórico definido (Nersessian 2008). Es decir, el significado de los conceptos depende del contexto de indagación en el que originalmente se construyeron y de la evolución en los cambios contextuales teóricos que suceden en la historia.

Volta propuso a finales del siglo XVIII el término “fuerza de movimiento eléctrico” para describir el movimiento principal responsable de la corriente eléctrica en un “círculo conductor perfecto” (Roche 1987). Ese término derivó en el de “fuerza electromotriz” que aunque involucra la palabra fuerza su significado no es el del concepto de fuerza. Al considerar el poder sugestivo del lenguaje, el conflicto entre el significado aparente de este término y el significado actual muy probablemente no se resuelve por sí mismo. En este sentido, algunos autores de libros de texto han decidido evitar el uso de esta expresión haciendo sólo uso de su abreviación: fem (Knight 2008). Otros autores sugieren reemplazar el término fuerza electromotriz por uno que esté más acorde con su definición actual (Legault y Peschard 2001).

Nombres de conceptos de la teoría electromagnética, como el de *fuerza electromotriz*, ideados hace más de un siglo, quizás, ahora pueden ser engañosos, inapropiados o incorrectos, como se dijo anteriormente. Legault y Peschard (2001) citan varios ejemplos de libros de texto en los que se expresa la confusión que esta expresión genera. Sin embargo, como es el nombre considerado por la comunidad científica es el que se utilizará en este trabajo.

### a. Contexto teórico en el que se desarrolla el trabajo de Volta

Hasta el siglo XVII no se sabía en cuanto a la electricidad nada más que lo que los griegos conocían en tiempos de Tales: la propiedad del ámbar frotado, atrae a los cuerpos ligeros. A finales del siglo XVIII, mediciones cuantitativas precisas, permitieron incluir la Electricidad y el Magnetismo en el marco teórico newtoniano. En todo este proceso, en la primera mitad del siglo XVIII S. Gray (1670-1736) y C.F. Dufay (1698-1739) a partir de hechos determinados por observaciones cuidadosas dedujeron algunos principios generales que permitieron introducir cierto orden en la naciente ciencia de la Electricidad. En 1729 Gray descubrió que la *conducción de la electricidad* y el hecho de que algunos cuerpos no poseen esta propiedad (implícitamente diferencia *conductores* de *aisladores*); otro descubrimiento importante de Gray fue el de la *electrificación por inducción*. No hizo teoría, para él lo esencial era describir sus observaciones en un lenguaje corriente. Pocos años después, Dufay repitió los experimentos de Gray y demostró que todos los cuerpos se pueden electrificar, conductores y no conductores, siempre y cuando previamente se aislaran colocándolos “encima de un cojín de vidrio o de lacre”. Dufay también descubrió que existen *dos clases de electricidad*. También en la primera mitad del siglo XVIII, W. Watson (1715-1787) demostró la circulación completa de la electricidad mediante ingeniosos experimentos realizados con cadenas de observadores aislados mediante cojines de cera y cogidos de la mano unos a otros.

Hasta mediados del siglo XVIII los experimentos eléctricos y los magnéticos eran de tipo cualitativo, y no existía una hipótesis suficientemente desarrollada acerca de lo que significaba la electricidad. Los términos de efluvio, virtud, materia, torbellino, fluido, atmósfera, eran usados casi indistintamente. En el artículo “Electricidad” de L.G. Le Monnier de 1746 se puede apreciar el estado del espíritu de la época:

*“Los sentimientos de los físicos acerca de la causa de la electricidad están divididos: todos, empero, convienen en la existencia de una materia eléctrica más o menos concentrada alrededor de los cuerpos electrizados y que produce con sus movimientos los efectos eléctricos que percibimos; pero cada físico explica de un modo distinto las causas y las direcciones de esos diversos movimientos... Como no se conoce todavía la esencia de la materia eléctrica, es imposible definirla de otro modo que no sea por sus principales propiedades.” (Tatón 1988, Vol.II, p. 590)*

Desde el punto de vista newtoniano, las ideas no se hicieron más claras y distintas hasta llegar a las mediciones cuantitativas de Coulomb.

B. Franklin (1706-1790) realizó diversos experimentos que interpretó en una teoría que se funda en el postulado de un fluido eléctrico único del que todos los cuerpos poseen una cantidad “normal”. Las electrificaciones se producen cada vez que esta cantidad “normal” experimenta un aumento o una disminución, produciendo una carga “más” o “menos” (él introduce la expresión de carga eléctrica). Pero los efectos eléctricos se manifiestan también cada vez que la distribución del fluido eléctrico se modifica en un cuerpo conductor (inducción eléctrica). Por el hecho de que esta teoría afirma que todas las electrificaciones se deben a un traslado del fluido eléctrico –lo que gana un cuerpo lo pierde otro-, incluye el origen de la noción de “conservación de la carga”. Esta teoría es esencialmente newtoniana, aunque cualitativa.

Otros pensadores preferían la hipótesis de dos fluidos eléctricos, sugerida por los experimentos de Dufay. T. Bergman en 1765 fue, al parecer, el que la desarrolló más rigurosamente al proponer una doble ley de conservación: los dos fluidos preexisten en cantidades iguales en todo cuerpo en estado neutro; el acercamiento de un cuerpo electrificado, que atrae un fluido y repele el otro, los separa, y de aquí resultan los fenómenos de influencia.

El primer progreso importante del siglo XVIII de la ciencia del Magnetismo aparece publicado en 1750 en el *Tratado de los imanes artificiales* de J. Michell, seguidor de la cosmovisión newtoniana. Afirmó que “cada polo (de imán) atrae o repele exactamente a distancias iguales en cada dirección”, y que las “atracciones o repulsiones disminuyen en razón del aumento de los cuadrados de las distancias a los polos respectivos”. Pero los experimentos con que quiso validar esa ley fueron poco precisos y concluyentes. Otro notable avance en esta ciencia se da con el descubrimiento experimental de la termoelectricidad por parte de F. Aepinus (1724-1802). Si se calienta una aguja cristalina de turmalina, se electriza positivamente en un extremo y negativamente en el otro; los dos polos eléctricos de ese cristal son análogos por completo a los dos polos magnéticos de un imán. Esta observación lo llevó a desarrollar una teoría de los imanes y de la imantación por inducción, similar

a la teoría de la electricidad de Franklin: hay un fluido magnético único móvil en los cuerpos imantables.

El paso del terreno cualitativo al cuantitativo, es decir la formalización matemática de la Electroestática, ha sido atribuida a H. Cavendish (1731-1810) y C. Coulomb (1736-1806). Cavendish buscó establecer las posibles leyes de las interacciones eléctricas, suponiendo que eran en razón inversa de una potencia  $n$ -ésima de la distancia. Demostró que  $n$  debe ser inferior a 3. En toda su reflexión teórica uso la noción de “grado de electrificación” de un conductor, que posteriormente derivó en el concepto de *potencial eléctrico*. Dos cuerpos de formas distintas enlazados por un hilo conductor, no tienen la misma carga, pero sí el mismo grado de electrificación. Considerando que dos de las nociones fundamentales de la Electroestática actual son la de carga y potencial eléctrico, para este momento de la historia eran dos conceptos bastante evolucionados y que necesariamente tenían que llevar, en el caso estático, a la noción de *capacidad* tanto para un conductor como para un capacitor, y en el caso dinámico, a la noción de *corriente eléctrica*.

Coulomb cuya cosmovisión era newtoniana, en 1777 presenta un profundo estudio sobre los fenómenos magnéticos del que aquí vale resaltar un “corolario general” que afirma la necesidad de una teoría newtoniana de las acciones magnéticas:

*“La dirección de una aguja imantada no puede depender de un torrente de fluido... Resulta de la experiencia, que no son torbellinos los que producen los diferentes fenómenos de imantación, y que, para explicarlo, hay que recurrir necesariamente a fuerzas atractivas y repulsivas de la naturaleza de aquellas de que hay que servirse para explicar el peso de los cuerpos y la Física celeste.” (Tatón 1988, Vol.II, p. 600)*

En 1785 publica su primera memoria fundamental sobre la Electricidad en la que presenta su primera demostración rigurosa de la hoy conocida ley de Coulomb, basándose en sus experimentos sobre la repulsión eléctrica realizados con su famosa balanza de torsión. Esta ley permite definir operativamente la carga eléctrica de un cuerpo. La balanza de Coulomb permite medir la carga (al poder medir la interacción de cuerpos cargados), y, por medio del plano de prueba (barra de goma laca que tiene en un extremo un

disco metálico que sirve para recoger la electricidad), medir su densidad en un punto.

En otra memoria de 1786 aborda el problema de distribución de la electricidad en los conductores; mediante experimentos establece que:

*“El fluido eléctrico no se difunde en ningún cuerpo por afinidad química... sino que se reparte entre cuerpo diversos en contacto simplemente por su acción repelente”; y luego que, “llegado el estado de estabilidad, se encuentra difundido por la superficie de los cuerpos y no penetra en el interior”. (Tatón 1988, Vol.II, p. 601)*

De acuerdo a lo expuesto hasta aquí, antes de 1789 las bases de la Electrostática y la Magnetostática, experimental y matemática, estaban así sentadas. En general, la perspectiva teórica desde la que se abordó esta empresa fue la newtoniana; lo que implicaba interpretar las interacciones eléctricas y magnéticas como “acciones a distancia”. Un texto que ilustra bien esta perspectiva es de P. Musschenbroek (1739):

*“Se ha objetado contra el sistema de la atracción que no se puede comprender cómo dos cuerpos pueden obrar recíprocamente el uno sobre el otro sin tocarse. Estoy de acuerdo en ello, pero confieso, a mi vez, que no tengo absolutamente ninguna idea de la acción recíproca de ningún cuerpo. En efecto, es imposible, para el espíritu humano, concebir lo que es la acción de dos cuerpos llevados el uno hacia el otro o que están en contacto: no tenemos idea alguna de la fuerza que los hace obrar, no se comprende cómo pasa esa fuerza del uno al otro ni el modo cómo se produce ni cómo deja de obrar. Es un misterio por encima del alcance de nuestro entendimiento.” (Tatón 1988, Vol.II, p. 603)*

Entre 1791 y 1800 se descubre el movimiento de la electricidad a través de materiales conductores, que da surgimiento a la noción de corriente eléctrica y a un nuevo campo de estudio llamado Electrocinética. En 1780, L. Galvani (1737-1798) observó casualmente los efectos de la electricidad en el movimiento muscular de las ranas. Su trabajo de muchos años sobre los espasmos de piernas de ranas bajo una variedad de estímulos, fue publicado en 1791, en su memoria *Sobre los efectos de la electricidad en el movimiento muscular*. En este escrito describió un nuevo fenómeno: cuando él conectó el nervio ciático y la pierna de una rana disecada con un arco de metal, preferiblemente hecho de dos metales diferentes, la pierna se movió. Él concluyó de sus investigaciones que el agente responsable de este efecto debería ser la electricidad, y después de excluir uno por uno todos los tipos de electricidad conocidos, Galvani sugirió que eso era electricidad animal (Kipnis

2003). Hasta entonces sólo se conocía la electrificación por frotamiento y por inducción electrostática. Además, su trabajo es el primer estudio sistemático sobre circuitos eléctricos cerrados.

Desde la perspectiva de Galvani, las “fuerzas vitales” producen y almacenan electricidades opuestas en el nervio y el músculo correspondiente como en una botella de Leyden, y conectando los dos con un buen conductor se genera una corriente instantánea de electricidad que estimula el nervio. Galvani siempre sostuvo su teoría de la *electricidad animal* y el símil con la botella de Leyden. Esta comparación pone de manifiesto la tendencia natural de los físicos de comienzos del siglo XIX a interpretar los nuevos hechos desde la perspectiva de la Electroestática (Benseghir y Closset 1996).

Lo presentado en este apartado muestra el contexto de familiaridad con la electricidad estática en la que se desarrolla el trabajo experimental y teórico de Volta. En la siguiente sección se hace un análisis detallado de sus estudios acerca de la electrificación por contacto, por ser el evento que da origen al concepto de *fuerza electromotriz*.

#### **b. Situación problemática que da origen al concepto de fem**

El otro fenómeno génesis de la Electrocínética es la electrificación por contacto entre metales diferentes. Las primeras observaciones de este fenómeno fueron hechas por A. Bennet (1749-1799) y descritas por él en 1789. El hecho básico es que si dos metales diferentes y eléctricamente neutros se ponen en contacto, se puede establecer experimentalmente que después del contacto cada uno tiene una carga neta; siendo estas iguales en magnitud y de signo opuesto (Fisher y Varney 1976).

En la misma época de los experimentos de Galvani, Volta era profesor de la Universidad de Pavía (desde 1779), con un conocimiento profundo de la Electroestática. A principios de 1792 consciente de la importancia del descubrimiento de Galvani, repite sus experimentos y observa reacciones que describió como biológicas, y siguiendo a Galvani, asume que la electricidad se origina en los tejidos animales, así como su conducción a través de ellos. En

octubre de 1792, independientemente de Bennet (quien trabajó estrictamente con aparatos físicos), Volta descubre que la electricidad se podía “generar” al poner dos metales diferentes en contacto; sin embargo, él dependía de los efectos biológicos para detectar la electricidad. Específicamente, observa que si se coloca la lengua entre dos arandelas metálicas de naturaleza diferente y enlazadas por un hilo de metal, se experimenta una sensación ácida o alcalina, según el orden de los metales, y que se tienen las mismas sensaciones si se aplica la lengua a un conductor que comuniquen con los polos negativo o positivo de una máquina eléctrica. Basado en estos experimentos esbozó una clasificación eléctrica de los metales, fundada en las intensidades de los sabores producidos en la lengua.

El hecho de que dos metales diferentes en contacto se electrifiquen, es decir, que se carguen y se mantengan así a pesar de que existe un camino conductor a través del cual las cargas pueden fluir y establecer un estado eléctrico neutro, está en contradicción con los principios de la electrostática. De acuerdo a la electrostática, cargas opuestas no deben separarse, y si se separan deberían recombinarse. El fenómeno en cuestión le planteó a Volta el problema de cómo explicar que los dos metales se cargaran con el contacto.

Volta ofreció una teoría alternativa a la de Galvani. La primera versión de esta teoría aparece en 1792, considera que los metales:

*“[son] verdaderos motores de electricidad, porque con su simple contacto ellos interrumpen el equilibrio del fluido eléctrico, lo sacan del reposo, cambian su estado inactivo, y lo llevan alrededor” (Kragh 2000, p 134)*

En los siguientes años sus ideas cambiaron un poco, pero no esencialmente. En contraste con Galvani, supuso que la electricidad se originaba fuera de la rana, en los metales, y la rana sólo era un conductor húmedo. Observó que las convulsiones tomaban lugar aun cuando metales idénticos tocaran el animal, siempre y cuando el circuito incluyera metales diferentes. Concluyó que el desequilibrio de la electricidad era creado entre metales diferentes y, por lo tanto, la electricidad de contacto era suficiente para explicar todo el fenómeno. Es decir, buscó reemplazar la teoría de la electricidad animal con la de la electricidad metálica.

En una carta a G. Green (1793-1841), escrita en 1796, se puede apreciar que Volta ya había alcanzado la formulación definitiva de su teoría:

*“El contacto entre conductores diferentes, sobre todo metálicos..., que llamaré conductores secos, o de primera clase, y conductores húmedos, o de segunda clase, despierta el fluido eléctrico y le comunica cierto impulso o incitación. Todavía no sé dar razón de la manera como se produce eso, pero basta con que sea un hecho general. Esta incitación —ya sea una atracción, una repulsión o un impulso cualquiera— es diversa y desigual tanto respecto de la diferencia de los metales como por lo que hace a diferentes conductores húmedos... Así, siempre que en un círculo completo de conductores se coloca uno de la segunda clase entre dos de la primera diferentes entre ellos, o uno de la primera clase entre dos de la segunda, también diferentes entre sí, se establecerá hacia la izquierda o hacia la derecha, según la fuerza predominante, una corriente eléctrica, una circulación de ese fluido que no se interrumpe más que rompiendo el círculo, y que restablece en seguida cada vez que se cierra el círculo.” (Tatón 1988, Vol.III, p. 238)*

En una segunda carta, también a Green, es aun más específico:

*“El contacto entre, por ejemplo, plata y estaño da surgimiento a una fuerza, un esfuerzo, que causa que el primero **dé** fluido eléctrico, y el segundo lo **reciba**: la plata tiende a liberarlo, y libera algo en el estaño, etc. Si el circuito también contiene conductores húmedos, esta fuerza o tendencia produce una corriente, un flujo continuo del fluido, el cual viaja en la dirección mencionada arriba desde la plata al estaño, y desde el estaño vía el conductor húmedo vuelve a la plata y entonces vuelve al estaño, etc. Si el circuito no está completo, si los metales están aislados, el resultado es una acumulación de fluido eléctrico en el estaño a expensas de la plata...” (Kragh 2000, p 134-135; el resaltado es del autor)*

Como se puede apreciar Volta hizo una descripción fenomenológica. Propuso llamar a la fuerza que causa la separación del fluido eléctrico (hoy carga eléctrica) *fuerza electromotriz*. Así, más que explicar propone un término para describir el fenómeno; el cual aparece en sus escritos desde 1796 y es más claramente usado en un informe de 1801. En este escrito, define la nueva fuerza, es decir la fuerza electromotriz, como una medida de la perturbación del equilibrio de la electricidad entre dos metales, igual a la tensión eléctrica en un circuito abierto; que sólo depende de la naturaleza de los metales y no de su geometría o tamaño. Afirmó que la fuerza electromotriz con la cual el contacto mueve la electricidad es más intensa si las dos sustancias en contacto son conductores sólidos (dos metales), y es más débil si el contacto es entre un conductor sólido y uno líquido, o si es entre dos conductores líquidos. En el informe mencionado, Volta también presenta la culminación de su transición de métodos biológicos a físicos para medir la electricidad generada por el contacto

de los dos metales y el caso en el que interviene un electrolito en el contacto (Fisher y Varney 1976, Kragh 2000).

El hecho de que las cargas se muevan al poner en contacto los dos metales diferentes muestra que la acción es motriz. Volta fue consciente de una propiedad de tales contactos: si se conecta apropiadamente mediante un conductor húmedo o electrolito (que asegura un contacto íntimo entre los dos metales permitiendo el paso de la electricidad del uno al otro) para formar un circuito cerrado, provoca corrientes eléctricas continuas. Esto ciertamente lo llevó a aceptar más profundamente la naturaleza motriz de la fem. Es de resaltar que como no existía la noción de energía en el contexto de Volta, él se centraba en hablar de una fuerza que comunica un impulso al fluido eléctrico, sin preguntarse si esa imagen no lo enfrentaba con un movimiento perpetuo y si no era necesario buscar cuál era el “precio” de todas aquellas cargas y tensiones constantemente renovadas (Tatón 1988).

Ahora bien, los efectos observados eran débiles, por esto muchas veces los detectores que se utilizaban para poner de manifiesto la electricidad seguían siendo los músculos de rana y las sensaciones de gusto en la lengua. No obstante, también en 1796, G. Fabbroni (1752-1822) observó que si se sumergen en agua dos láminas de metales diferentes una de ellas se oxida, siempre y cuando los dos metales estén en contacto en la parte exterior al agua. En consecuencia, Fabbroni supuso que existía un vínculo entre el fenómeno eléctrico y el químico.

A finales de 1799, Volta inventó un dispositivo que llamó “pila eléctrica”. Tal dispositivo consistía en una pila de pares de discos cinc-cobre en contacto directo, pero separado cada par del siguiente por un cartón húmedo con agua. La pila afectaba un electrómetro y producía sensaciones de choque, sabor, luz, y sonido; además, la intensidad de los fenómenos observados era bastante notable. Volta, como era de esperar, interpretó la pila en términos de la teoría de electrificación por contacto de dos metales diferentes. La estrecha relación entre la pila y el concepto teórico de electrificación por contacto se refleja en el título de una carta que le escribió a J. Banks (1743-1820) en 1800: “Sobre la Electricidad Excitada por el Simple Contacto de Sustancias Conductoras de

Diferentes Clases”. En posteriores publicaciones, Volta mantiene que la acción de la pila se debía únicamente al contacto entre los metales y que el conductor húmedo solamente sirve para facilitar el paso del fluido eléctrico, es decir, la conducción de la corriente eléctrica (Tatón 1988, Kragh 2000, Kipnis 2003).

La pila de Volta fue rápidamente reproducida en laboratorios europeos. Esto permitió la amplificación de los primeros efectos galvanicos observados (contracciones musculares) y la identificación de los efectos químicos y térmicos de la corriente. Estos desarrollos contribuyeron a que en 1800 el fenómeno de electrificación por contacto fuera reconocido unánimemente como un hecho científico.

Un aspecto notable de la teoría de Volta era la interpretación dinámica de la electrificación por contacto de dos metales diferentes. Al parecer, él distinguía entre efectos electrostáticos de la pila y los producidos cuando sus extremos están conectados por un conductor. El siguiente texto de Volta ilustra esto:

*“Estos poderosos y maravillosos efectos son sólo la suma de los efectos de varios pares metálicos..., de esta electricidad, de esta corriente continua del fluido eléctrico la cual por acción de metales acoplados, se establece tan pronto como un conductor une los dos extremos del aparato, y una vez establecido, se mantiene así misma y dura tanto como el círculo no se rompa.” (Benseghir y Closset 1996, p. 181)*

Considerando que en el campo de la electricidad las explicaciones electrostáticas constituían el esquema conceptual dominante y casi único durante el primer tercio del siglo XIX, la pila fue explicada como un dispositivo electrostático, durante casi cuarenta años. Las explicaciones alternativas en términos de corrientes en movimiento, eran rechazadas por parte de los miembros de la Academia de las Ciencias de París, incluidos los trabajos de A. M. Ampere (1775-1836) (Brown 1969, Buchwald 1977, Sutton 1981, Montero 2007).

Con este panorama, es necesario enfatizar la originalidad de la idea de Volta de circulación continua del *fluido eléctrico*. Los científicos contemporáneos de Volta, hacían uso del carácter discontinuo de las descargas eléctricas para hacer sus interpretaciones. Los físicos del Instituto de Francia, algunos de los cuales fueron considerados los arquitectos de la electrostática y ante quienes Volta defendió su teoría del contacto de dos metales diferentes en 1801,

tuvieron problema para aceptar el aspecto dinámico de la teoría (Brown 1969). Ellos sólo aceptaron el principio de la producción de la electricidad por contacto en un circuito abierto. Así, la idea de una corriente continua de fluido eléctrico desapareció completamente en el informe escrito por J. B. Biot (1774-1862) en ese mismo año, a petición de una comisión del Instituto.

La disposición de los físicos de comienzos del siglo XIX a confiar en el conocimiento electrostático para aproximarse al fenómeno de la electrificación por contacto de dos metales diferentes, llamado por algunos el fenómeno voltaico, se expone claramente en el siguiente pasaje de Haüy de 1803:

*“La nueva investigación que aun necesita ser llevada a cabo para disipar la nube que cubre esta parte de la ciencia no debe resultar en el establecimiento de una distinción esencial entre galvanismo y electricidad sino en la conciliación de la electricidad consigo misma.” (Benseghir y Closset 1996, p.182)*

Esta reinterpretación de la pila en términos electrostáticos se basó en la construcción de una analogía entre esta y la botella de Leyden: Conectar los extremos de la pila a un conductor es análogo del proceso de descarga de una botella de Leyden; la única diferencia es que después de que la botella se ha descargado no se producen más efectos, mientras que la pila se electrifica así misma continuamente y sus efectos se reproducen continuamente. Esto significa que la pila se interpretó en términos del fenómeno de descarga.

La implicación metodológica de esta actitud fue que la investigación se enfocó en los extremos de la batería, considerados separadamente y en circuito abierto. Después de 1820 se aceptó la distinción entre un circuito abierto y un circuito cerrado. También, más o menos hasta este tiempo, hubo interés en la *tensión de la electricidad* en los extremos de la pila. Esta situación no permitía que emergiera la idea de *corriente del fluido eléctrico*.

De acuerdo a lo anterior, es de notar que las principales observaciones y mediciones de Volta no fueron de corrientes sino de diferencias de “tensión del fluido eléctrico” (noción que antecedió al concepto de potencial eléctrico) que se producían entre los metales en contacto (con o sin un electrolito entre ellos) y que él medía con electroscopios, en su mayoría creados por él.

En resumen, el origen del concepto de fuerza electromotriz está ligado a una de las nociones que antecedió al concepto de potencial eléctrico: tensión del fluido eléctrico. Las otras dos nociones previas al concepto de potencial eléctrico fueron: grado de electrificación y la función potencial. Para comprender cómo se llega a la noción actual de fuerza electromotriz vale la pena abordar la evolución de la teoría del potencial.

### **c. Teoría del potencial y su aplicación al análisis de los circuitos de corriente continua**

Durante la década de 1770, el electrómetro típico tenía un brazo de puntero que se movía a través de un ángulo cuando el electrómetro era conectado a un objeto metálico que había sido cargado eléctricamente. La cantidad de carga extra era medida por el número de vueltas de una manivela de conducción; un dispositivo de carga electrostática. El ángulo que se movía el puntero debido al incremento en la cantidad de carga del objeto de metal, también dependía de la geometría del objeto cargado. Esta dependencia de la geometría creó un dilema: ¿Qué propiedad del objeto cargado mide la deflexión del puntero? De la investigación impulsada por mejorar la tecnología del electrómetro surgió la noción de “*tensión eléctrica*”, que antecedió al concepto de potencial eléctrico (Steinberg 2008)

Volta partió de visualizar el “fluido eléctrico” en un metal como compresible, y respecto al electrómetro consideró que este medía un estado “semejante a una presión” en este fluido que llamó “*tensión eléctrica*”. La imagen visual que representa este esfuerzo “semejante a una presión” para hacer mover el fluido eléctrico (hoy día carga) es evidente en una carta enviada a un colega en 1778:

*“...la energía que yo llamo tensión eléctrica es el esfuerzo [del fluido eléctrico] para empujarse así mismo fuera [del metal]” (Steinberg 2008, p 164)*

Una década después, en 1788 Volta escribió que la tensión del puntero del electrómetro se debe a

*“...fuerzas ejercidas por cada punto de un cuerpo electrificado para liberarse así mismo de su electricidad y comunicársela a otros cuerpos” (Steinberg 2008, p 164)*

Al parecer, Volta usó el nombre de *tensión* debido a su enfoque en la tensión del puntero del electrómetro que es una consecuencia de la presión en el fluido eléctrico compresible empujando hacia el exterior. Esta idea es análoga a la “presión alta de la sangre” que se conoce como “hipertensión”, la cual describe la tensión en las paredes de una arteria causada por la presión alta de la sangre. Es de notar que antes de que Volta se interesara por el estudio de la electricidad investigó sobre gases; posiblemente este conocimiento es el origen de su interpretación del fluido eléctrico como semejante al aire, y generando *presión* donde se acumula o es comprimido.

Poco después de introducir la idea de tensión eléctrica, Volta intentó modificar su modelo de fluido compresible para incluir la acción electrostática a través del espacio alrededor de conductores cargados considerando la semejanza entre las siguientes dos situaciones: un objeto caliente aumenta la presión del aire sobre un recipiente cercano y lleno de aire a temperatura ambiente; de manera análoga un disco cargado A aumenta la tensión eléctrica sobre un disco conductor B descargado. En palabras de Volta:

*“El fluido eléctrico en B... aumenta la fuerza expansiva tanto como lo hace el aire en un contenedor de densidad normal cuando es calentado.” (Steinberg 2008, p 170)*

Volta no profundizó este razonamiento analógico con la temperatura.

La idea de “tensión eléctrica” de Volta se volvió tan popular que aun hoy se usa en algunos contextos como sinónimo del concepto actual de “potencial eléctrico” que desplazó la noción de Volta alrededor de 1850.

Cavendish había inventado una idea similar a la de Volta, unos pocos años antes. Sin embargo, él la llamó “grado de electrificación”; un término que no sugería un agente causal y recibió poca atención.

Los físicos matemáticos de principios del siglo XIX continuaron los trabajos de Cavendish, Volta y Coulomb y consumaron la tarea de enlazarlos con los principios de la Mecánica newtoniana. A partir del análisis de las acciones que varían en razón inversa del cuadrado de la distancia, desarrollaron la teoría del potencial y la aplicaron a la Electricidad y el Magnetismo.

En 1777, J. L. Lagrange (1736-1813) había logrado condensar y simplificar la teoría de atracción entre cuerpos, proponiendo una función  $V(x, y, z)$  que hoy se conoce como “potencial newtoniano”. Esta función se define en cada punto del espacio como la “suma de todas las masas de atracción, divididas, cada una, por su distancia a ese punto”; a partir de esta función se podían calcular todas las fuerzas del sistema.

En 1782, P. S. Laplace (1749-1827) mostró que esta función  $V(x, y, z)$  satisface, además de las masas, a una ecuación en derivadas parciales, conocida hoy como la *ecuación de Laplace*. En 1813, S. D. Poisson (1781-1840) amplió los cálculos de Laplace a regiones que contienen materia o electricidad distribuidas con una determinada densidad, consiguiendo establecer la ecuación que hoy se conoce como *ecuación de Poisson*. Esta ecuación es más general que la de Laplace y, desde el punto de vista histórico, constituye la expresión “local” de un teorema descubierto por Green en 1828 y luego redescubierto, en otras formas, por M. Chasles (1793-1880) en 1837 y C. F. Gauss (1777-1855) en 1839: el flujo de fuerza (hoy día se dice –de acuerdo a la teoría de campos- flujo de campo) que sale de una superficie cerrada es igual a  $4\pi$  veces la suma algebraica de las cargas eléctricas –o de las masas- situadas en el interior de esta superficie. En los libros de texto actuales, la ecuación de Poisson se presenta como derivada de la ley de Gauss. La noción de flujo de fuerza fue desarrollada por los matemáticos posteriormente, y por Faraday con independencia de ellos y más intuitivamente (basado en los resultados de sus experimentos), en 1831.

Como se dijo previamente, Cavendish empezó a desarrollar la noción de *grado de electrificación* de un conductor en equilibrio, y Poisson la relacionó con la función  $V$  de Lagrange y Laplace, que posteriormente derivó en la noción de *potencial*. Independientemente de esta línea, también se mencionó previamente, Volta había definido de manera casi cualitativa la *tensión eléctrica*, y Ampere, en una memoria de 1820, distinguió con claridad entre los conceptos de tensión e intensidad (de corriente). Pero, hasta ese momento, la mayor parte de los físicos, carecían de una relación posible entre la tensión de

una pila, la intensidad de la corriente que produce en un conductor y la naturaleza de éste.

Poisson también logró resolver con rigor el problema de la distribución de la electricidad en un sistema de dos esferas, cuya solución teórica aproximada había buscado previamente Coulomb después de realizar un estudio experimental exacto del mismo.

*“Partiendo del principio de que “la resultante de las acciones de las capas eléctricas superficiales que recubren los conductores tiene que ser nula en un punto cualquiera de su interior”, Poisson infiere primero que la función  $V$  tiene que ser constante en todo el volumen de un conductor (cuyo grado de electrificación mide), y luego obtiene, mediante un difícil cálculo, fórmulas explícitas de la densidad de electricidad en cada punto de la superficie de las esferas, fórmulas bien verificadas por los datos experimentales de Coulomb.” (Tatón 1988, Vol.III p. 234)*

En 1828, Green en su *Ensayo sobre la aplicación del Análisis matemático a la teoría de la Electricidad y el Magnetismo*, le dio a la función  $V$  el nombre de *función potencial*, precisó las propiedades de esta función y la utilizó para demostrar algunos teoremas importantes tanto para las matemáticas en general como para la Electricidad y el Magnetismo. Aunque no explicó por qué la escogencia de este término (Roche, 2003).

La palabra potencial fue también usada por Gauss independientemente de Green, en su trabajo *“Teoremas generales sobre fuerzas de atracción y repulsión que obran en razón inversa de los cuadrados de las distancias”* publicado en los años 1839-1840. Gauss le dio al potencial el mismo significado matemático que Green.

Desde la invención de la pila hasta los inicios de la década de 1820, las mediciones cuantitativas de los efectos de las pilas eran difíciles debido a su inconsistencia, es decir, no se podían obtener corrientes constantes. Esto mejoró con el descubrimiento de la termoelectricidad en 1821, por parte de T. J. Seebeck (1770-1831). Este descubrimiento fue desarrollado por J. Peltier (1785-1845) en 1834, y fue muy importante por dos razones: desde el punto de vista teórico permitió transformar energía térmica en energía eléctrica, y desde el punto de vista práctico permitió construir pilas termoeléctricas perfectamente constantes. En este contexto, G. S. Ohm (1787-1854) inició sus experimentos

sobre corrientes eléctricas en 1825, primero con pilas de Volta y luego con elementos termoeléctricos cobre-bismuto, y así estableció la ley que hoy lleva su nombre: ley de Ohm, que en los términos de la época:

*“i representa la intensidad de la corriente, medida o registrada por la desviación de la aguja de un galvanómetro;  $\epsilon$ , la “tensión” de la pila, proporcional al número de sus elementos en serie; R, su resistencia, también proporcional a ese número; y r la resistencia del circuito exterior, dependiente, como había establecido Davy, de su naturaleza y dimensiones.” (Tatón 1988, Vol.III p. 249)*

Finalmente, las mediciones de las tensiones de las pilas, es decir, lo que hoy se conoce como las fuerzas electromotrices, se convierten en un trabajo fácil. Ohm, en su estudio “Tratamiento matemático de la cadena galvánica”, vuelve a establecer su ley pero por vía analítica. Partió de las hipótesis formuladas por Fourier en su “Teoría analítica del calor” y las tradujo a la electricidad. Por ejemplo, consideró la intensidad de la corriente, o flujo de electricidad, como análogo del flujo de calor; y el análogo de la temperatura Ohm lo llamó *fuerza electroscópica* en un punto dado. Su hipótesis es la siguiente:

*“Una molécula electrizada sólo puede comunicar electricidad a las moléculas contiguas..., la magnitud del flujo entre dos moléculas contiguas es proporcional, en paridad de las demás condiciones, a la diferencia entre las fuerzas electroscópicas poseídas por las dos moléculas, del mismo modo que en la teoría del calor el flujo del mismo se considera como proporcional a la diferencia de sus temperaturas.”*  
*“La tensión (o fuerza electromotriz) se define por el principio siguiente: cuando dos cuerpos se tocan, se establece en el punto de contacto una diferencia constante entre sus fuerzas electroscópicas.” (Tatón 1988, Vol.III p. 249-250)*

Así, la noción de fuerza electroscópica queda precisada desde el punto de vista de la teoría de los circuitos eléctricos; faltaba describir su relación con la Electrostática. Ohm da una definición electrostática de la fuerza electroscópica, al describir sintéticamente su medición mediante un electroscopio:

*“Éste es un simple plano de prueba “de muy pequeñas dimensiones, de tal modo que cuando se pone en contacto con la parte del conductor [recorrido por una corriente] que se quiere explorar, se lo puede... considerar como ocupando el lugar de dicha parte; entonces, si las fuerzas electroscópicas [de ese plano de prueba] medidas de la manera que he dicho (por la fuerza que ejerce sobre una especie de balanza de Coulomb) son diferentes en los diversos puntos, esas diferencias nos revelan las diferencias que existen entre los estados eléctricos de esos puntos.” (Tatón 1988, Vol.III p. 250)*

De acuerdo a esto, parece que Ohm identificó la noción de fuerza electroscópica con lo que hoy conocemos como la densidad eléctrica. Sólo

hasta 1845 Kirchhoff identificó la fuerza electroscópica de Ohm con el potencial eléctrico de Poisson y de Green; un hecho que pone de manifiesto uno de los fines más importantes de las ciencias que es el de la vinculación de dominios aparentemente inconexos (Chalmers 1970).

Después de 1850 se entendió, por la mayoría de estudiosos del tema, que el potencial eléctrico es equivalente a la tensión eléctrica de Volta en conductores, y se hicieron predicciones en el espacio que rodea los conductores donde la idea de Volta no tenía nada que decir. Además de la ventaja de mayor alcance, el potencial eléctrico ofrecía una completa cuantificación e hizo posible exploraciones matemáticas en condiciones ideales. Estas posibilidades hicieron del concepto de potencial eléctrico una herramienta de investigación superior que sustituyó la idea de Volta en el uso científico. La función potencial, hasta mediados del siglo XIX, en general fue pensada como una función para expresar funciones intensidad. A partir de aquí se le da el significado físico en ciertas circunstancias, en términos de trabajo hecho sobre una unidad de masa, carga o intensidad de polo (Roche 2003).

La teoría de potenciales newtonianos es un cuerpo de resultados sobre las propiedades de las fuerzas caracterizadas por la ley de gravitación universal de Newton. Pero sus aplicaciones se extienden a otras fuerzas del mismo carácter, es decir fuerzas entre cargas eléctricas y fuerzas entre polos magnéticos. Pero la teoría del potencial también puede ser mirada como la teoría de una cierta ecuación diferencial, la ecuación de Laplace.

La diferenciación entre acciones conservativas y no conservativas, central en el significado de la noción de fem, se puede ubicar en un artículo de Helmholtz de 1847, donde señaló que cuando las fuerzas no dependen únicamente de la posición es difícil asimilarlas en una imagen en la que el principio de conservación de la energía mecánica se cumpla. El argumento que justifica esta afirmación, teniendo en cuenta que una fuerza que sólo depende de la posición se puede expresar como el gradiente de una energía potencial, es que si la energía potencial también depende de una variable diferente a la posición, entonces la cantidad de energía potencial almacenada por un cuerpo se vuelve dependiente de la trayectoria. Así, dice Helmholtz, es muy difícil ver cómo la

suma de energía potencial y energía cinética podría permanecer constante. Por ejemplo, un problema particular que comentó Helmholtz, fue el caso de la “ley de la fuerza” que había sido propuesta por Weber en 1846, basada en una mecánica de materia imponderable donde la carga era una análogo de la masa. Esta ley expresa la fuerza entre partículas eléctricas, ya sea que estén en reposo o en movimiento. Para el caso de corrientes eléctricas, la ley de Weber postula que la fuerza depende, además de la posición, de la velocidad y la aceleración (Archibald 1986). El comentario de Helmholtz pone en evidencia la necesidad de diferenciar entre fuerzas que sólo dependen de la posición y fuerzas que además dependen del tiempo; para hacer el análisis de algunos sistemas físicos en el campo del electromagnetismo.

Como la ley de Weber tenía un carácter mecánico, propició que se preguntaran por su relación con las leyes de conservación de la mecánica, en particular el principio de la vis viva. También dio ímpetu a la investigación acerca de los potenciales para fuerzas que no sólo dependen de la distancia; ya que hasta ese momento la teoría del potencial estaba centrada en las fuerzas que sólo dependen de la posición.

#### **d. De la acción a distancia a la acción contigua: el concepto de campo**

En un mundo en el que lo primero que se percibe es la existencia de una gran diversidad de materiales y de seres, sometidos a continuos cambios, la ciencia busca establecer leyes y teorías generales que sean aplicables al mayor número posible de fenómenos. La síntesis del electromagnetismo es un ejemplo de esta búsqueda de coherencia y globalidad (Almudí 2001).

Un problema fundamental, que subyace a todas las teorías físicas, es *¿cómo un cuerpo puede actuar sobre otro?* Esta cuestión se puede desglosar en preguntas más específicas como: *¿por qué un cuerpo empuja a otro en vez de penetrar en él?*, *¿por qué un imán es capaz de hacer que un trozo de hierro a cierta distancia se mueva?*, *¿cómo es posible que un cuerpo electrizado haga que pequeñísimos trozos de papel se muevan hacia él?*, o *¿por qué algunos cuerpos cortan a otros?*

Desde la antigua Grecia se han propuesto soluciones al problema de la interacción entre cuerpos (Aristóteles, Platón), que implicaban cosmovisiones acerca de la naturaleza del mundo. Por ejemplo, Aristóteles propuso que para mover un cuerpo fuera de su lugar natural, en la región sublunar, es necesario que otro agente externo ejerza una fuerza -en el sentido aristotélico-. Otros pensadores, a partir del Renacimiento, como Descartes, Galileo y Newton, mejoraron las teorías de los griegos y propusieron otras.

La mecánica newtoniana, se caracterizó por ser una teoría física de carácter matemático que establecía que los cuerpos están formados por corpúsculos que actúan a distancia unos sobre otros instantáneamente. En el caso gravitacional, la intensidad de la acción es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia entre los cuerpos. Esta teoría permitió predecir, con gran éxito, nuevos resultados mostrando ser muy superior a cualquier teoría precedente en la historia del pensamiento humano, y convirtiéndose así en un punto de referencia que no podía ser ignorado por ninguna otra teoría posterior.

Sin embargo, la mecánica no explica otros modos de acción de un cuerpo sobre otro, por ejemplo, las fuerzas eléctricas, magnéticas ni químicas. En el intento de interpretar los fenómenos electromagnéticos, durante el siglo XVIII y gran parte del XIX, los seguidores de la mecánica newtoniana, en particular Ampere y W. E. Weber (1804-1891), la extendieron a las fuerzas eléctricas y magnéticas; pero, a medida que se fueron conociendo fenómenos que evidenciaban la relación entre la electricidad y el magnetismo, este modelo teórico fue insuficiente. Así, se fue consolidando la teoría electromagnética de campos, desarrollada durante el siglo XIX, principalmente por M. Faraday (1791-1867), Maxwell y Hertz. Esta teoría está basada en la noción de *campo*, es decir, explica la acción de un cuerpo sobre otro a cierta distancia considerando que la acción se da a través de un medio, el campo, como sustrato de la interacción. En el caso de la enseñanza de la física actual, se presenta como el paradigma vigente para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos.

De acuerdo con el desarrollo histórico de la teoría electromagnética, el concepto de campo electromagnético fue introducido por Maxwell, quien partió

de la noción de *líneas de fuerza* planteada por Faraday. Considerando que el objetivo de las ciencias naturales es reducir los problemas de la naturaleza a la determinación de cantidades para operaciones con números, Maxwell, haciendo uso de analogías físicas, se propuso llevar ante la comunidad científica, de una forma conveniente y manejable, las ideas matemáticas necesarias para el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Para comprender en qué contexto, del trabajo de Faraday, surge la noción de líneas de fuerza y por ende la de campo, es pertinente notar que Faraday hace parte de aquellos científicos que se han interesado más por establecer un modelo del mundo, es decir, una descripción de las cosas y propiedades fundamentales que lo constituyen, a partir de la cual se hacen hipótesis sobre las leyes que gobiernan los cambios que se dan en él; acorde con esto, la explicación de un fenómeno existe en relación con un determinado modelo del mundo (Berkson 1981). En contraste, al modo de trabajar de Faraday, están aquellos científicos, como por ejemplo H. A. Lorentz (1853-1928), O. Heaviside (1850-1925) o G. F. FitzGerald (1851-1901), que hicieron más hincapié en las leyes o en aspectos específicos de una teoría. En el caso de la enseñanza de la física, la mayoría de los libros de texto se fijan fundamentalmente en las leyes de la física, como un todo, dejando de lado el análisis de la cosmovisión que subyace a la teoría abordada. El modelo del mundo que subyace a la teoría electromagnética de campos, es muy importante, por lo menos desde el punto de vista histórico, para comprenderla. En el caso de la noción de campo, es una noción que se puede apreciar como consecuencia de la cosmovisión que propone Faraday.

La imagen de mundo sostenida por Faraday consistía en suponer que *la fuerza es la única sustancia física*. En el panorama que tenía Faraday en la segunda década del siglo XIX, estaba el éxito de las teorías de la electricidad y el magnetismo desarrolladas por separado, por Coulomb desde la perspectiva newtoniana, es decir, teniendo como premisa que la interacción entre cuerpos se puede dar a distancia e instantáneamente. Además, tenía conocimiento de los experimentos de Volta; asimismo, conocía la observación de W. Nicholson (1753-1815) y A. Carlisle (1768-1840), también en 1800, de que la corriente

eléctrica puede descomponer sustancias químicas; y, sabía de la hipótesis de H. Dhabí (1778-1829) de que los enlaces químicos son de naturaleza eléctrica. Con la posibilidad de producir corriente eléctrica continua y el conocimiento de la Electroestática, Faraday se plantea la pregunta de si ¿es posible que ambos efectos procedan de la misma causa? En el caso de los experimentos de Nicholson y Carlisle se ponía en evidencia que es posible transformar una fuerza en otra, en este caso, fuerzas eléctricas en fuerzas químicas; y con la hipótesis de Davy, se abría la posibilidad de transformar fuerzas químicas en fuerzas eléctricas, o que sencillamente no fueran diferentes.

Además, en el panorama de Faraday, se daba que la cosmovisión más extendida, a comienzos del siglo XIX, era la newtoniana. Esta cosmovisión se podría caracterizar por proponer que el mundo está constituido por corpúsculos sólidos y extensos, espacio vacío y fuerza. Cada corpúsculo posee la propiedad de “actuar a distancia” y ejercer fuerzas directa e instantáneamente sobre otros cuerpos del universo. Newton desarrolló la mecánica y la teoría de la gravitación en base a este modelo fundamental. Sus teorías fueron tan eficientes, que muchos de los seguidores de Newton buscaron aplicarla a otro tipo de interacciones, como la cohesión, la electricidad o el magnetismo. También existían cosmovisiones no newtonianas, aunque menos exitosas que la de Newton, y el conflicto entre las dos formó una parte muy importante de la situación problemática de Faraday.

Faraday, se sintió inclinado a asumir la hipótesis de la unidad de las fuerzas, y, por ende, el mundo físico como un mar continuo de puntos de fuerza (no existen átomos ni vacío). Una muestra de esta visión unificadora de Faraday se puede apreciar en la introducción a una conferencia presentada en 1813:

*“No me atrevo a afirmar positivamente que la atracción de agregación y la afinidad química sean realmente lo mismo que la acción gravitatoria y la atracción eléctrica. Pero tengo para mí que sí, y cuando tenga el honor de presentarme ante ustedes, les expondré las razones de mi opinión, y llamaré de nuevo su atención sobre un nuevo punto de vista de las propiedades atractivas de la materia.” (Berkson 1981, p. 53)*

Faraday, además, supone que las fuerzas no actúan a distancia, sino sobre otras fuerzas contiguas; esta hipótesis lleva a la idea de un “mar de fuerzas”. Esta idea se puede interpretar como una primera aproximación a una teoría de

campos, en la cual la acción de un cuerpo sobre otro a cierta distancia se da a través de un medio como sustrato de la interacción. En el caso de Faraday *este medio era la fuerza misma*, mientras que para muchos otros el medio era una sustancia sólida o viscosa llamada *éter*.

Laplace y otros desarrollaron matemáticamente la teoría de Newton utilizando la idea de campos de fuerzas y potenciales, pero la noción de campo era empleada como un mero recurso matemático para calcular la fuerza ejercida por un conjunto de cuerpos sobre un objeto de prueba. Suponían que sólo había fuerzas en puntos del espacio donde había materia, en contraste, la teoría de campos sustenta que los campos de fuerza, o el éter, existen incluso allí donde no hay materia.

Aunque se podría seguir profundizando en la cosmovisión de Faraday, ya que en el transcurso de todo su trabajo científico siempre retomaba aspectos de ésta que precisaba o redefinía, creemos que las ideas sobre tal cosmovisión, presentadas aquí, permiten comprender mejor el paso de la perspectiva de acción a distancia a la perspectiva de campos, a propósito del análisis e interpretación de los fenómenos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos.

La noción de campo nace ligada a la noción de líneas de fuerza, ambas propuestas por Faraday, en su búsqueda por interpretar y explicar las observaciones realizadas en varios experimentos que él mismo diseñó. El primero de estos experimentos lo llevó a observar el fenómeno de las "rotaciones electromagnéticas". De paso cabe anotar, fue su primer descubrimiento en electromagnetismo. Para comprender el contexto problemático en el que se diseña este experimento vale la pena enunciar los descubrimientos de H. C. Oersted (1777-1851), y de Ampere, y algunas de las ideas que estos experimentos suscitaron en sus autores.

Oersted cuya cosmovisión era antinewtoniana, conocía el hecho de que el hierro se imanta con un rayo (se observó en el primer tercio del siglo XVIII), por ende suponía que todas las fuerzas deberían ser convertibles unas en otras. Con esta idea en mente, en 1820, descubrió que la corriente eléctrica produce

efectos sobre una aguja magnética. Oersted concebía la corriente eléctrica como:

*“una sucesión de interrupciones y restablecimientos de equilibrio, de tal suerte que las fuerzas eléctricas en la corriente no estaban en equilibrio estable, sino en un estado de conflicto continuo” (Berkson 1981, p. 57)*

Con esta idea, explicaba lo observado en su experimento asumiendo que los sucesos que tienen lugar en las proximidades del cable son reales, en sus palabras:

*“De los hechos anteriores se deduce evidentemente que el conflicto eléctrico no está confinado en el conductor, sino que se encuentra ampliamente disperso por el espacio circundante.” (Berkson 1981, p. 59)*

Faraday encontró valioso el descubrimiento de Oersted y vio la trascendencia de precisar qué interacción exacta había entre la electricidad y el magnetismo. Asimismo, Ampère, una semana después de enterarse del trabajo de Oersted descubrió la interacción entre dos corrientes eléctricas. La cosmovisión de Ampère era newtoniana, y de acuerdo con Coulomb, suponía que sólo había interacciones entre fenómenos de la misma naturaleza. Por tanto, con el descubrimiento de Oersted, Ampere se ve forzado a concebir que el magnetismo es un aspecto de la electricidad, idea que sigue siendo vigente en la teoría actual, y que fue corroborada por su observación de atracción y repulsión entre corrientes paralelas y antiparalelas respectivamente; así como, la atracción y repulsión de dos electroimanes, semejante a la de dos imanes rectos. Además, Ampere se ve obligado a preguntarse ¿cómo explicar los resultados del experimento de Oersted y los suyos, en el marco de su visión newtoniana? Y, así, desarrolla una brillante teoría matemática, de corte newtoniano sobre la atracción entre corrientes. Teoría que no fue refutada por ningún experimento, pero sólo era válida para corrientes cerradas y tenía algunas desviaciones con respecto a la teoría newtoniana (Tatón 1988).

Faraday aunque admiraba la teoría de Ampere fue crítico de ella, básicamente por dos razones. En primer lugar, la teoría de Ampere estaba basada en la hipótesis de los fluidos eléctricos, mientras que Faraday al suponer que la materia actúa sólo a través de la fuerza propuso pensar la carga eléctrica no como dos fluidos eléctricos, uno positivo y otro negativo, sino más bien como el

resultado de una propiedad específica de la materia que constituye el cuerpo cargado; al respecto Faraday decía en 1816:

*“La existencia de este fluido (eléctrico) es, sin embargo, totalmente hipotética, y puede que los efectos dependan de alguna propiedad común a la materia en general; y esto es tanto más probable cuanto que no se conoce ninguna materia que deje de exhibir esos peculiares fenómenos (eléctricos) en determinadas circunstancias.” (Berkson 1981, p. 55)*

En segundo lugar, la teoría de Ampere no explicaba cómo conciliar que en la interacción de cargas estáticas, cargas iguales se repelen y cargas distintas se atraen; mientras que en la interacción de corrientes, corrientes iguales se atraen y corrientes distintas se repelen. En otras palabras, la teoría de Ampère, no era unificada, en cuanto que explicara los efectos estáticos como los que involucraban corrientes.

Con el anterior conocimiento, Faraday se propuso crear una explicación alternativa a los resultados de Oersted. Aunque interpretaba la noción “conflicto eléctrico” de Oersted (su noción de corriente), como una teoría de los fluidos eléctricos, y por lo tanto no la compartía; apreciaba una idea, que puede considerarse como característica de los primeros orígenes de la teoría de campos electromagnética. En palabras de Faraday:

*“El conflicto eléctrico no se encuentra confinado en el conductor, sino que está muy extendido por el espacio circundante; ya que en otro caso no actuaría a distancia sobre la aguja” (Berkson 1981, p. 63)*

Con esta idea Faraday repitió los experimentos de Oersted y afirmó que estos efectos y los observados por Ampere, no se deben a atracciones y repulsiones, sino más bien a la tendencia del cable a girar en torno al polo de la aguja magnética, y viceversa. ¿Cómo probar, con un experimento diferente, esta hipótesis? Para resolver esta situación diseñó un montaje con el que hizo girar un alambre recto por el que pasa una corriente, alrededor de un imán; y viceversa, un imán alrededor del alambre con corriente; este experimento, realizado en 1822, se conoce como “rotaciones electromagnéticas”. En resumen, el dispositivo se puede describir así:

*“Un recipiente lleno de mercurio, un imán sumergido a medias, de modo que sólo un polo sobresaliera del líquido, mientras que el otro quedaba fijo en el eje del aparato; la corriente entra por el fondo del recipiente y sale por un hilo sumergido en el mercurio:*

*unas veces el imán inclinado gira alrededor del hilo vertical; otras, el hilo inclinado, barriendo la superficie del mercurio, gira alrededor del imán vertical ” (Tatón 1988, Vol.III p. 251)*

A partir de esto, concluyó que la fuerza en los alrededores del cable era perpendicular a un círculo concéntrico con su eje. Pone gran énfasis en mostrar que las interacciones entre imanes y cables se podían explicar simplemente por la tendencia del alambre a girar en torno a un polo magnético; no había necesidad de introducir la hipótesis de Ampère de las atracciones y repulsiones entre los cables.

Así nació el concepto de campo. Se creyó que era un “agente” de la corriente, mediante el cual ésta transmitía su acción. Pero resultó ser un concepto que permitía traducir las leyes que describían los fenómenos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos a un lenguaje claro y sencillo.

#### **e. Descubrimiento del fenómeno de inducción electromagnética y su relación con el concepto de fem**

Posiblemente el descubrimiento más importante de Faraday fue el de la inducción electromagnética en 1831. ¿Cómo descubrió la inducción electromagnética? Desde el conocimiento del experimento de Oersted, Faraday era consciente de la importancia del problema de la transformación del magnetismo en electricidad, que es el fenómeno inverso al observado por Oersted. En 1824, F. Arago (1786-1853) hizo un descubrimiento que proporcionó nuevas razones a Faraday para suponer tal transformación. Suspendiendo una aguja imantada sobre un disco de cobre, y haciéndolo girar, la aguja también giraba; además, si un imán giraba sobre los extremos del disco, éste empezaba a girar con él.

Por otro lado, Faraday impulsado por los trabajos contemporáneos de Young en Inglaterra y Fresnel en Francia, los cuales rebatían la teoría corpuscular de la luz de Newton, propuso pensar la corriente eléctrica como una onda de variación de la carga eléctrica, que se transmite por un conductor; en otras palabras, Faraday concebía la corriente eléctrica como “la vibración de grados variables de tensión en un conductor” (Berkson 1981). Así, se plantea que la

variación de la intensidad de la fuerza magnética sobre un conductor debe provocar un cambio en la tensión total del conductor y por consiguiente debe afectar la intensidad de la vibración que discurre por el cable, es decir, la corriente eléctrica. En sus palabras:

*“Como la corriente eléctrica producida por una pila voltaica afecta fuertemente a un imán al pasar por un conductor metálico, haciendo que sus polos se orienten en torno al conductor y moviendo de esta forma considerables masas de materia, era de suponer que sobre la corriente eléctrica se ejercería una reacción capaz de suscitar algún efecto visible; por varias razones se esperaba que el acercamiento del polo de un potente imán disminuiría la corriente eléctrica.” (Berkson 1981, p. 89)*

En 1831, se planteó si un cambio brusco de la fuerza magnética que actúa sobre un cable, como el producido por la repentina creación de un electroimán, ¿podría provocar un cambio en el estado de tensión del cable? De su cosmovisión se sigue lógicamente que si la fuerza constituye la única *sustancia física* no puede ser creada, porque de la nada es imposible; ahora bien, si la fuerza desaparece no sería la sustancia básica. Esto se puede considerar como un principio de conservación de la fuerza, y de acuerdo con éste, Faraday pensaba que si la fuerza que transcurre por un cable sufre una variación de intensidad, ésta ha de quedar compensada por algún cambio en las fuerzas circundantes; y en consecuencia, el cambio repentino de la fuerza que actúa sobre un cable debe producir, de acuerdo con su noción de corriente, una corriente eléctrica.

El primer montaje que mostró resultados acordes con estas hipótesis consistió en un electroimán construido con un anillo grueso de hierro. En una mitad enrolló un cable cuyos extremos iban a una batería, en la otra mitad enrolló otro cable cuyos extremos iban a un galvanómetro. Al cerrar el circuito de la batería, el anillo se imantaba y el galvanómetro indicaba un breve paso de corriente; y al abrir el circuito, el anillo se desimantaba y el galvanómetro nuevamente indicaba un breve paso de corriente.

Faraday no estudió cuantitativamente el fenómeno de inducción electromagnética, ni formuló ecuaciones al respecto. En cambio, estableció con gran detalle, y con rigor experimental, la estructura cualitativa del fenómeno. Para explicar lo observado, de acuerdo con su cosmovisión, Faraday propone

considerar que el cable está en un estado especial en presencia de un campo magnético, a este estado lo llamó *estado electrotónico*; y la creación o variación del estado electrotónico siempre producía una corriente eléctrica (Marazzini y Tucci 1983). Utilizando esta explicación, Faraday interpreta y corrobora experimentalmente que el fenómeno observado por Arago, se debía a la imantación del disco de cobre giratorio a causa de las corrientes inducidas en éste .

Faraday para contrastar su explicación del fenómeno de Arago, hizo girar un disco de cobre entre los dos polos magnéticos de un imán de herradura, y midió las corrientes inducidas conectando los terminales de un galvanómetro mediante cables a la circunferencia y el centro del disco. Este experimento le suscitó un problema a Faraday:

*“si era o no esencial que la parte móvil del cable (o del disco conductor), al cortar las curvas magnéticas, pasara a posiciones de mayor o menor fuerza magnética; o si, cortando siempre líneas magnéticas de la misma intensidad, el simple movimiento era o no suficiente para el paso de electricidad.” (Berkson 1981, p. 96).*

Para resolver esta cuestión Faraday realizó el experimento denominado de inducción unipolar. Se coloca uno de los polos de un imán recto en el centro de un disco de cobre y se hacen girar solidariamente en torno al eje del imán. En este dispositivo experimental la fuerza magnética (hoy campo magnético) es simétrica con respecto al eje del imán cilíndrico y del disco, esto significa que si se toma un plano que corte perpendicularmente al eje y se dibuja un círculo con centro en él, la intensidad de la fuerza magnética será la misma en todos los puntos del círculo. Por lo tanto, si el imán y el disco giran en torno a su eje común, ningún punto experimentará cambio alguno en la intensidad de la fuerza magnética que actúa sobre ellos. Asimismo, si se hace girar únicamente el disco alrededor del eje, tampoco experimentará ningún cambio en la intensidad de las fuerzas que actúan sobre él.

Faraday observó que en los dos casos enunciados se genera una corriente continua. Estas observaciones no concordaban con su hipótesis de que únicamente por el aumento o disminución de la intensidad de la fuerza magnética sobre un cable, es decir por la variación de la intensidad del estado

electrotónico, se producía el fenómeno de inducción. Ahora, se tenía que el simple movimiento dentro de un área de fuerza magnética constante podía ser causa de la inducción. Para explicar esta nueva observación, introdujo la noción de *líneas de fuerza* al proponer la hipótesis de que la condición básica para la inducción reside en que el cable *corte* las líneas de fuerza. De acuerdo con esta explicación,

- (i) Si una sección de un cable se mueve a lo largo de una línea de fuerza, no hay fenómeno inductivo.
- (ii) Si un cable corta las líneas de fuerza, hay fenómeno inductivo.
- (iii) Si diferentes partes del circuito interceptan distinto número de líneas de fuerza, hay fenómeno inductivo.

Así pues, la hipótesis de las líneas de fuerza explicaba las nuevas observaciones, y además lo que inicialmente explicaba la noción de estado electrotónico.

En 1832, Faraday escribe:

*“Un circuito está constituido por dos hilos doblados uno sobre el otro, soldados juntos en un extremo y unidos por el otro a los dos bornes de un galvanómetro. Cualquiera que sea la naturaleza de esos hilos, no pasa por ellos ninguna corriente cuando los dos cortan las mismas líneas de fuerza: sus movimientos en el campo crean en él **tensiones** que se compensan; pero unidos por separado al galvanómetro y en las mismas condiciones, las intensidades medidas están en razón inversa de las resistencias.” (Tatón 1988, Vol.III p. 253; resaltado por el autor)*

Por lo tanto, para él el fenómeno primario no es la creación de una corriente, sino la de una fuerza electromotriz de inducción, independientemente de la naturaleza y de las propiedades de los circuitos. Además, esta fuerza sólo depende del movimiento relativo del conductor respecto del imán inductor, o en un sentido más general, respecto de las líneas de fuerza.

Maxwell basado en el estudio cuantitativo del trabajo de Faraday, y otros científicos como H. E. Lenz (1804-1865), la llamó ley de inducción magneto-eléctrica en los siguientes términos:

*“La fuerza electromotriz actuando alrededor de un circuito en cualquier instante es medida por la tasa de decrecimiento del número de líneas de fuerza magnética que pasan a través de este.” (Maxwell 1881, Vol.II p. 176).*

Es de notar que lo expresado por Maxwell indica una forma de medir la fem inducida, no una causa de esta.

En 1861 Maxwell publicó (Roche 1987) una descripción de un modelo hidrodinámico, que tenía el propósito de dar una explicación mecánica, entre otros fenómenos, de la inducción electromagnética. En este modelo las líneas de fuerza magnéticas eran representadas por líneas de vórtices en el éter, y todas las formas de la inducción electromagnética eran debidas a la rotación diferencial de vórtices vecinos actuando sobre las partículas rotantes que los separan a ellos. El empuje resultante sobre estas partículas constituye la fuerza electromotriz inducida.

Desde 1835 en la parte continental de Europa, creció una explicación no magnética de la inducción electromagnética. Motivada por las investigaciones de Gauss, F. E. Neumann (1798-1895), Weber y muchos otros. Todos inspirados en la electrodinámica de Ampere, cuya perspectiva no considera la existencia de campo. De acuerdo a esta visión, la fuerza magnética era una fuerza “electrodinámica”. Todas las formas de inducción electromagnética que aparecen en un alambre que es movido en la vecindad de un imán o de un conductor que transporta una corriente, es debida a una intensidad eléctrica que actúa a lo largo del alambre y que es producido por la interacción entre cargas eléctricas en el alambre y las que constituyen la corriente o el imán. En el siglo XX, sin embargo, la tradición electrodinámica llevó a la creencia de que la fem inducida en un alambre en movimiento es debida a un campo eléctrico actuando a lo largo de ese alambre.

En 1892, Lorentz propuso una teoría de la inducción electromagnética teniendo en cuenta la tradición continental y la británica. Él aceptó la existencia de campos eléctricos y magnéticos cualitativamente diferentes, producidos por y propagándose desde cargas eléctricas. Reconoció que los electrones libres en un alambre que se mueve perpendicular a un campo magnético serán interpretados por el campo como una corriente eléctrica y, por lo tanto, experimentarían una fuerza transversal que actuará a lo largo del alambre. En concordancia con esto, la fuerza electromotriz simplemente es una fuerza

magnética, causada por el campo magnético y no por algún campo eléctrico inducido.

**f. Teoría actual: la fem y la diferencia de potencial dos conceptos epistemológicamente diferentes pero relacionados**

Como se dijo previamente, el origen de los conceptos de fuerza electromotriz y potencial eléctrico está entrelazado, pero a medida que fue evolucionando el estudio e interpretación de los fenómenos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, las nociones que les antecedieron se fueron modificando hasta llegar a ser hoy dos conceptos completamente diferenciados integrados a la teoría electromagnética de campos actual.

De acuerdo a Varney y Fisher (1980) la noción de Volta de *fem* en términos actuales es:

*“La fem es una acción no electrostática sobre las cargas en conductores que causa que cargas diferentes se separen y se mantengan separadas.”*

De acuerdo a las observaciones de Volta, realizadas con pilas, la diferencia de potencial entre los bornes de una pila debe ser el “contrapeso” de la causa de la fem; por esto él consideró que la diferencia de potencial en circuito abierto es la medida de la fem. Es de notar, que esto no implica que la diferencia de potencial y la fem sean conceptos idénticos.

Después de la formulación del concepto de fem por parte de Volta, se descubrieron muchas más acciones no electrostáticas sobre cargas. Por ejemplo, el efecto termoeléctrico o Seebeck en 1821, la piezoelectricidad en 1880, el generador de Van der Graff en 1931, entre otros. En cada uno de estos casos donde el término fem es usado, constituye una medida de un tipo particular de acción no electrostática sobre cargas.

El descubrimiento del fenómeno de inducción electromagnética en 1831, se constituyó en el caso en el cual una acción no electrostática no necesariamente hace que cargas diferentes se separen.

Los conceptos de diferencia de potencial y fem son diferentes, para justificar esta afirmación se presentan los dos conceptos y se enfatizan sus similitudes y diferencias. En aras de la claridad, antes de presentar el concepto de diferencia de potencial se considera el concepto de potencial eléctrico.

Como se sabe, el análisis dinámico de un sistema físico, tanto a nivel macroscópico como microscópico, se puede hacer desde la perspectiva de los conceptos de fuerza y momento lineal o de los conceptos de trabajo y energía. De manera similar, un sistema físico en el que se presentan interacciones eléctricas, se puede analizar haciendo uso del concepto de campo eléctrico o del concepto de potencial eléctrico. Siendo dos enfoques complementarios. En este sentido, los conceptos de potencial y de campo eléctrico permiten analizar y discutir fenómenos que podría ser más difícil analizar directamente en términos de energía y fuerza. Además, así como algunas veces es más conveniente, y más simple o más claro, analizar un sistema en términos de energía más que de fuerza; algunas veces es más conveniente, y más simple o más claro, analizar un sistema en términos de potencial más que de campo.

Ahora, así como la definición operativa de campo eléctrico es fuerza por unidad de carga,

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.1)$$

La de potencial eléctrico es energía potencial eléctrica por unidad de carga:

$$V \equiv \frac{U}{q_0} \quad (1.2)$$

Para enfatizar algunas características de esta definición vale la pena recordar tres puntos importantes (Young y Freedman 2009):

- (i) Cuando una fuerza  $\vec{F}$  actúa sobre una partícula que se mueve de un punto  $a$  a un punto  $b$ , el trabajo  $W_{a \rightarrow b}$  efectuado por la fuerza se define como:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} \quad (1.3)$$

donde  $d\vec{l}$  es un desplazamiento infinitesimal a lo largo de la trayectoria de la partícula.

- (ii) Si la fuerza  $\vec{F}$  es *conservativa* el trabajo realizado por  $\vec{F}$  siempre se puede expresar en términos de una energía potencial  $U$ . Cuando la partícula se mueve de un punto donde la energía potencial es  $U_a$  a otro donde es  $U_b$ , el cambio en la energía potencial es  $\Delta U = U_b - U_a$ , el trabajo  $W_{a \rightarrow b}$  que realiza esta fuerza conservativa es  $W_{a \rightarrow b} = -\Delta U$ . Cuando el trabajo  $W_{a \rightarrow b}$  es positivo, la energía potencial disminuye.
- (iii) El teorema del trabajo y la energía establece que el cambio en la energía cinética  $\Delta K$  durante cualquier desplazamiento es igual al trabajo total realizado sobre la partícula. Si el único trabajo efectuado sobre la partícula lo realizan fuerzas conservativas, entonces la ecuación  $W_{a \rightarrow b} = -\Delta U$  da el trabajo total, y  $\Delta K = -\Delta U$ . El trabajo que realizan fuerzas conservativas siempre es reversible. En contraste, el trabajo realizado por una fuerza *no conservativa* se presenta en procesos no reversibles, y no puede representarse con una función de energía potencial. Algunas fuerzas no conservativas hacen que se disipe la energía mecánica; mientras que otras la aumentan.

De acuerdo a lo anterior, como la definición de potencial electrostático (1.2) está en términos de la energía potencial  $U$ , entonces es un concepto que se aplica al análisis de procesos en los que hay fuerzas *conservativas* involucradas.

Como se dijo en (ii)  $W_{a \rightarrow b} = -\Delta U$ , que en este caso expresa el trabajo realizado por una fuerza eléctrica conservativa, ejercida por un campo eléctrico  $\vec{E}$ , durante un desplazamiento de  $a$  a  $b$ . Si se divide esta ecuación entre  $q_0$ , para calcular el “trabajo por unidad de carga”, se obtiene:

$$\frac{W_{a \rightarrow b}}{q_0} = -\frac{\Delta U}{q_0} = -\left(\frac{U_b}{q_0} - \frac{U_a}{q_0}\right) = -(V_b - V_a) = -\Delta V_{ab}$$

donde  $V_a = U_a/q_0$  es la energía potencial por unidad de carga en el punto  $a$ , de manera análoga para  $V_b$ . Como se sabe,  $\Delta V_{ab}$  es el potencial de  $a$  con respecto a  $b$  (o diferencia de potencial), igual al trabajo realizado por la fuerza eléctrica (conservativa) cuando una unidad de carga se desplaza de  $a$  a  $b$ .

De acuerdo a la definición (1.1), la fuerza  $\vec{F}$  sobre una carga de prueba  $q_0$  se expresa como  $\vec{F} = q_0\vec{E}$ . Haciendo uso de la ecuación (1.3) y dividiéndola entre  $q_0$ , se encuentra la diferencia de potencial eléctrico definida en términos del campo eléctrico, entre los puntos  $a$  y  $b$ :

$$\Delta V_{ab} = - \int_a^b \vec{E}_c \cdot d\vec{l} \quad (1.4)$$

donde  $d\vec{l}$  es un elemento del camino de integración entre los puntos  $a$  y  $b$ . Considerando lo expresado, el campo eléctrico que aparece en la ecuación (1.4) es *conservativo* y por lo tanto el valor de la integral es independiente de la trayectoria. A partir de ahora, este campo se nota como  $\vec{E}_c$  para diferenciarlo de los campos  $\vec{E}_{nc}$  no conservativos o no electrostáticos.

La idea de Volta acerca de la fem de una batería, en términos actuales, se puede expresar proponiendo la hipótesis de que existe un campo eléctrico no conservativo  $\vec{E}_{nc}$  [Varney y Fisher (1980) y Becker (1964) lo llaman campo impreso] actuando con una fuerza no electrostática sobre una unidad de carga de prueba. En el caso del fenómeno de inducción electromagnética el campo no conservativo  $\vec{E}_{nc}$ , por lo general se puede “observar” directamente y es medible. La fem ( $\varepsilon_{ab}$ ) entre dos puntos  $a$  y  $b$  se puede definir como

$$\varepsilon_{ab} = \int_a^b \vec{E}_{nc} \cdot d\vec{l} \quad (1.5)$$

similar a la definición de  $\Delta V_{ab}$ , ecuación (1.4). Sin embargo, la integral de  $\varepsilon_{ab}$  depende del camino de integración entre  $a$  y  $b$ , una característica esencial del concepto de fem actual. Además, el signo de las dos integrales es diferente. Mientras la definición de  $\Delta V_{ab}$  en la ecuación (1.4) es negativa, la definición de la  $\varepsilon_{ab}$  en la ecuación (1.5) es positiva. El signo menos en la definición de  $\Delta V_{ab}$  indica que el trabajo realizado por el campo electrostático  $\vec{E}_c$  sobre una carga de prueba para moverla de  $a$  a  $b$  genera una disminución de la energía potencial. En contraste, la fem  $\varepsilon_{ab}$  positiva indica que el trabajo realizado por el campo no electrostático  $\vec{E}_{nc}$  sobre una carga de prueba para moverla de  $a$  a  $b$  implica un aumento de la energía potencial eléctrica. Esta diferencia tiene una

característica importante: las fem pueden hacer el trabajo necesario para establecer diferencias de potencial electrostático. Por ejemplo, en el caso de la batería en circuito abierto la fem de la batería conduce cargas a los terminales hasta que la diferencia de potencial es tal que  $\varepsilon_{ab} - \Delta V_{ab} = 0$ . Como se sabe, en circuito cerrado  $\varepsilon_{ab} - \Delta V_{ab}$  no necesariamente es cero.

En el caso del fenómeno de electrificación por contacto de dos metales diferentes, que se presenta, por ejemplo, en las baterías, el campo no conservativo  $\vec{E}_{nc}$  es un concepto heurístico. Esto significa que  $\vec{E}_{nc}$ , entendido como una fuerza sobre una carga de prueba, no puede ser directamente observado o medido. Sin embargo, el fenómeno observado puede ser representado como si tal campo existiese (Varney y Fisher 1980).

Para explicar mejor por qué el concepto de  $\vec{E}_{nc}$  es heurístico cuando se aplica en la interpretación del comportamiento de las baterías, consideremos la siguiente situación: Si se tiene una variación de concentración dentro de una *solución acuosa diluida de un electrolito fuerte* (por ejemplo HCl). Se presentará un proceso de difusión con la tendencia de allanar la variación de concentración. Esto implica que el electrolito quede casi completamente disociado en iones  $H^+$  y  $Cl^-$  los cuales se difunden independientemente uno del otro. La movilidad y por lo tanto también la velocidad de difusión de los iones de  $H^+$  es, sin embargo, mucho más grande que la de los iones de  $Cl^-$ . La consecuencia es una corriente en la dirección de disminución de la concentración, toda vez que más iones  $H^+$  son puestos en movimiento hacia los lugares de más baja concentración que los iones de  $Cl^-$ . Este movimiento de difusión es considerado el origen de una fuerza no electrostática (y por lo tanto no conservativa) debida al campo  $\vec{E}_{nc}$  finito. La corriente debida el proceso de difusión, produce una carga positiva de las porciones diluidas de la solución y una carga negativa en las posiciones de concentración, y por lo tanto da surgimiento a un campo eléctrico electrostático  $\vec{E}_c$  de tal dirección que inhibe el proceso de difusión de los iones  $H^+$ , y la aceleración de los iones de  $Cl^-$ . Finalmente se alcanza un estado de equilibrio en el cual, mediante el campo  $\vec{E}_c$ , la diferencia en la velocidad de difusión de los dos tipos de iones es exactamente nula. Entonces se tiene el estado de corriente eléctrica cero, que

se puede designar por la expresión  $\vec{E}_c + \vec{E}_{nc} = 0$ , ya que el movimiento de transportadores de carga en conductores, y por ende el flujo de corriente eléctrica, no se produce únicamente por el campo eléctrico  $\vec{E}_c$ . Para el caso en consideración también existe una causa no electrostática que hace fluir la corriente a través de la solución conductora. Tal causa es el campo  $\vec{E}_{nc}$ . Al considerar este campo en la ley de Ohm, se tiene  $\vec{J} = \sigma(\vec{E}_c + \vec{E}_{nc})$  (Becker 1964).

Un segundo aspecto para considerar el concepto  $\vec{E}_{nc}$  como heurístico, es porque en muchos tipos de baterías, a diferencia del ejemplo anterior, sólo existe in-homogeneidad en la zona donde el electrodo y el electrolito se tocan. En este caso el campo eléctrico no conservativo  $\vec{E}_{nc}$  se vuelve una función delta, es decir que  $\vec{E}_{nc}$  es infinito pero en una distancia que tiende a cero. Como se sabe, la función delta está caracterizada por su integral (Boas 1983). En este caso esta integral es la que define  $\varepsilon_{ab}$  (ecuación 1.5), donde  $a$  y  $b$  son puntos dentro del electrodo y el electrolito respectivamente (Varney y Fisher 1980).

La comparación entre los conceptos de fem y de diferencia de potencial eléctrico se puede resumir en la tabla 1.2.

Pero es de notar, que hay situaciones donde la fem no causa diferencias de potencial. Un anillo resistivo con un flujo magnético variable a través de él, experimenta una fem distribuida a lo largo del resistor. La fem conduce la corriente alrededor del anillo pero no produce diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera del anillo.

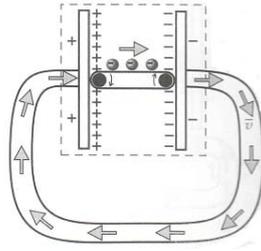
Al analizar el concepto de fem se puede hacer énfasis en el aspecto motriz, al afirmar que para que una corriente circule en un circuito se requiere una fem. Sin embargo, es de notar que no siempre una fem implica circulación de corriente. Ejemplos de esto es la fem generada por la piezoelectricidad (fenómeno presentado por determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica generando una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie); la fem generada

por el contacto bimetálico (fenómeno de electrificación por contacto de dos metales diferentes); y los experimentos de circuito abierto.

**Tabla 1.2 Comparación entre los conceptos de fem y diferencia de potencial**

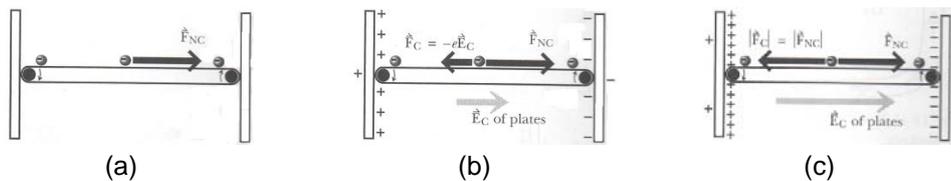
Diferencia de Potencial	Fuerza Electromotriz
$\Delta V_{ab} = - \int_a^b \vec{E}_c \cdot d\vec{l}$	$\varepsilon_{ab} = \int_a^b \vec{E}_{nc} \cdot d\vec{l}$
$\vec{E}_c$ es un campo electrostático o conservativo.	$\vec{E}_{nc}$ es un campo no electrostático o no conservativo.
La integral es <i>independiente</i> del camino de integración.	La integral es <i>dependiente</i> del camino de integración.
Si $\Delta V_{ab}$ es negativo significa que el trabajo realizado por el campo electrostático $\vec{E}_c$ sobre una carga de prueba para moverla de $a$ a $b$ genera una disminución de la energía potencial.	Si $\varepsilon_{ab}$ es positiva significa que el trabajo realizado por el campo no electrostático $\vec{E}_{nc}$ sobre una carga de prueba para moverla de $a$ a $b$ implica un aumento de la energía potencial eléctrica.
Esta última diferencia supone una característica importante: la fem puede hacer el trabajo necesario para establecer diferencias de potencial electrostático.	

Considerando la definición de fem expresada por la ecuación (1.5), siempre que esta sea presentada a los estudiantes es necesario enfatizar que el campo no incluye campos conservativos. Esta necesidad se puede mostrar considerando los límites de integración  $a$  y  $b$ , como representando los dos terminales de una batería en circuito abierto, con el camino de integración tomado a través de la batería. Dentro de esta batería hay campo electrostático generado por la carga acumulada en los terminales de la batería, y campo no electrostático generado por la acción química de la batería, el campo responsable de la fem. Como no fluye corriente a través de la batería, estos campos se contrarrestan mutuamente. Esto se puede ilustrar desde el punto de vista microscópico con un modelo mecánico de la batería, cuyo comportamiento es mucho más fácil de entender que el de una batería química (Chabay y Sherwood 2002).



**Fig. 1.6 Una batería mecánica: una correa transportadora mantiene una separación de carga que impulsa una corriente estacionaria en el**

Esta batería mecánica está formada por una correa transportadora impulsada por un motor o una manivela que hala los electrones fuera de una placa positiva y los empuja sobre la placa negativa (ver figura 1.6). Si inicialmente las placas están descargadas (ver figura 1.7(a)) y se enciende el motor, extrayendo electrones de la placa del lado izquierdo y transportándolos a la placa del lado derecho. La cinta transportadora, impulsada por el motor, ejerce lo que se puede llamar una fuerza no coulombiana  $\vec{F}_{nc}$  sobre cada electrón. Si esta es la única fuerza, la correa acelera los electrones. Como el motor continúa transportando electrones a la derecha, se acumula carga en las placas. Las cargas sobre las placas ejercen una fuerza coulombiana de intensidad  $eE_c$ , sobre los electrones que están siendo transportados, en la dirección opuesta a  $\vec{F}_{nc}$ , coulombiana que ejerce la correa transportadora (ver figura 1.7(b)). Entonces, la aceleración de los electrones es menor. Siendo las fuerzas coulombiana y no coulombiana opuestas en el interior de la batería.



**Fig. 1.7 (a) Se pone en marcha el motor y comienzan a moverse los electrones de izquierda a derecha. (b) La carga se acumula sobre las placas y ejerce una fuerza de coulomb sobre los electrones que están siendo transportados. (c) La fuerza de Coulomb crece hasta ser tan intensa como la fuerza no coulombiana.**

Finalmente, hay suficiente carga sobre las placas para hacer que  $F_c = eE_c = F_{nc}$ . En ese momento el motor no puede impulsar más carga, y las placas alcanzan un valor máximo de carga (ver figura 1.7(c)). Emplear la expresión

$$\varepsilon_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}, \text{ con } \vec{E} \text{ indicando la suma de todos los campos en la batería,}$$

sería igual a cero y por lo tanto también la integral; lo que no permitiría dar la fem de la batería. Para dar la fem la ecuación (1.5) es la correcta, siendo el campo no electrostático.

De acuerdo a Varney y Fisher (1980), la definición

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.6)$$

con  $\vec{E}$  indicando la fuerza total por unidad de carga de prueba, debido a todas las causas, ya sea electrostática, electromagnética, química, piezoeléctrica, Seebeck, etc. Es la definición estándar de la teoría electromagnética. Usando los símbolos  $\vec{E}_c$  y  $\vec{E}_{nc}$  para distinguir entre campos electrostáticos y no electrostáticos, se puede escribir la definición (1.6) como

$$\varepsilon = \oint (\vec{E}_c + \vec{E}_{nc}) \cdot d\vec{l} \quad (1.7)$$

que es la forma en que aparece en algunos textos (Panofsky y Phillips 1972). Aunque la ecuación (1.7) parece violar lo mencionado en el párrafo anterior por incluir  $\vec{E}_c$ , se puede apreciar que  $\oint \vec{E}_c \cdot d\vec{l}$  es cero debido al carácter conservativo de los campos electrostáticos. Esto implica que la definición (1.7) realmente es equivalente a

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_{nc} \cdot d\vec{l} \quad (1.8)$$

El uso del camino de integración cerrado elimina la necesidad de especificar que el campo conservativo debe ser excluido, ya que en esta forma su contribución a la fem se hace cero. La definición (1.8) tiene como implicación que la fem sólo se debe definir para un camino cerrado. Estrictamente hablando, la definición no es equivocada ya que si la integración se lleva a cabo, por ejemplo, a lo largo de un camino que va a través de una batería y alrededor del exterior de ella por un camino cerrado (con o sin un circuito conductor conectado a los terminales) entonces en la ecuación (1.8),  $\vec{E}_{nc}$  es cero fuera de la batería de modo que la fem bien puede ser escrita como

$$\varepsilon = \int_a^b \vec{E}_{nc} \cdot d\vec{l}$$

con  $a$  y  $b$  en los terminales, y con el camino de integración especificado para ser a través de la batería. Este es el sentido con el cual la fem es usada en la ley de las mallas de Kirchhoff, y también es el sentido con el cual se entiende en electroquímica cuando se habla de “la fem de una celda”.

Un aspecto a tener en cuenta acerca del concepto de fem es que hay una gran variedad de acciones no electrostáticas, es decir, de modos de generar una fem; estas acciones tienen diferentes propiedades y características. Así, la fem química de una celda electrolítica, originada por reacciones químicas, y la fem física, originada en el fenómeno de inducción electromagnética además de su origen no conservativo tienen poco en común. Asimismo, cuando la definición en forma integral de fem (1.5) es aplicada a una batería de Volta el valor de la  $fem_{ab}$  es observable y medible mientras que el campo no conservativo  $\vec{E}_{nc}$  es más un constructo que algo que se pueda estudiar directamente. La formulación integral se vuelve análoga a decir el área dentro de una figura geométrica pero no se conoce la forma de la figura. La existencia de una forma es sin embargo propuesta como hipótesis aunque no se conoce la forma. En contraste, en el caso electromagnético el campo  $\vec{E}_{nc}$  en ciertas circunstancias se puede observar directamente y medir como se puede con la fem, pero para muchos propósitos (no todos) es importante limitar el uso del término fem a la integral cerrada (1.8).

Como se mencionó en el apartado 1.1.1 existe la tendencia a confundir las nociones básicas de fem, diferencia de potencial, la naturaleza de la medida proporcionada por un voltímetro (voltaje) y la aplicabilidad de la ley de Ohm. Una manera de clarificar las diferencias entre estas nociones se puede hacer a partir del análisis de situaciones físicas hipotéticas que permitan el empleo de ellas.

Si se tiene algún sistema disipativo de dos terminales (Reif 1982), indicado esquemáticamente en la figura 1.6.



**Fig. 1.6 Sistema general de dos terminales**

Para que una corriente dc estacionaria  $i$  pueda fluir a través de este sistema se requiere que el incremento en la energía interna aleatoria del sistema, causado por las interacciones de las partículas cargadas en movimiento con las otras partículas atómicas en el sistema, sea suministrado por una cantidad de trabajo ( $W_{c+nc}$ ) realizado sobre estas partículas cargadas. Es de notar que este trabajo generalmente consiste tanto por trabajo hecho por fuerzas coulombianas como por fuerzas no coulombianas. La corriente  $i$  es cero si el trabajo por unidad de carga ( $V = W_{c+nc}/q_0$ ) es cero, mientras que  $i \neq 0$  si  $V \neq 0$ . Si la corriente no es muy grande, entonces la corriente  $i$  es proporcional a  $V$ . Por lo tanto se puede escribir

$$Ri = V \quad (1.9)$$

donde la constante de proporcionalidad  $R$  es llamada la “resistencia” del sistema de dos terminales.

El trabajo por unidad de carga sobre las partículas cargadas en movimiento a través del sistema desde A a B, realizado por las fuerzas conservativas de Coulomb, corresponde al potencial electrostático  $V$ , y es igual a la caída de potencial  $\Delta V = V_A - V_B$  desde el terminal A al terminal B. El trabajo por unidad de carga, hecho por las fuerzas no coulombianas sobre las partículas cargadas en movimiento dentro del sistema de dos terminales desde A hasta B, es (por la definición previamente presentada), la fem  $\mathcal{E}$  del sistema. Cuando se consideran estos dos tipos de trabajo, la relación (1.9) representa la forma generalizada de la ley de Ohm para la corriente que fluye a través del sistema desde A hasta B:

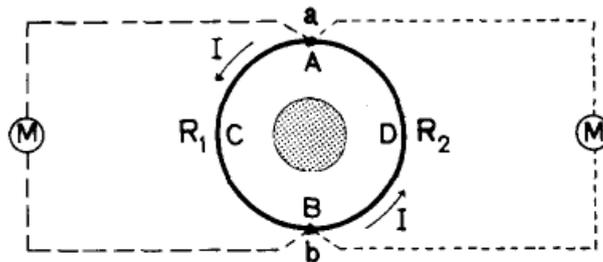
$$Ri = \Delta V + \varepsilon \quad (1.10)$$

Esta forma de la ley de Ohm es aplicable a cualquier sistema de dos terminales. En el caso particular de un sistema de dos terminales con fem igual a cero (es decir, si el sistema es un resistor), la ley (1.10) se reduce a la ley de Ohm tradicional  $Ri = \Delta V$ . En el caso particular de un sistema de dos terminales con resistencia igual a cero (es decir, si el sistema es una batería ideal), la ley (1.10) se vuelve

$$0 = \Delta V + \varepsilon \quad \text{o} \quad 0 = V_A - V_B + \varepsilon_{AB}$$

Esto implica que el valor de la diferencia de potencial  $V_B - V_A$  entre los terminales es igual a la fem  $\varepsilon_{AB}$  proporcionada por las interacciones químicas en la batería.

Situaciones más interesantes y potencialmente confusas (Klein 1981) se pueden abordar más fácilmente mediante la ley (1.10). Por ejemplo (Reif 1982), si se tiene un solenoide (indicado por la región circular sombreada de la figura 1.7) produce en esta región un campo magnético uniformemente variable, perpendicular al papel, el cual induce una fem  $\varepsilon$  constante a lo largo de cualquier camino alrededor del solenoide en la dirección contraria a las manecillas del reloj.



**Fig. 1.7 Anillo metálico no uniforme con una diferencia de potencial inducido magnéticamente. Las líneas desechada y de puntos indican conexiones de diferentes voltímetros. (Tomado de Reif 1982, p. 1049)**

La mitad izquierda ACB del anillo de metal circular indicado, concéntrico con el solenoide, tiene una resistencia  $R_1$ ; la mitad derecha BDA de este anillo tiene una resistencia  $R_2$ . Un problema interesante que se puede plantear es ¿cuál es la diferencia de potencial, si la hubiese, entre los puntos A y B diametralmente opuestos? Si se utiliza la ley general de Ohm (ecuación 1.10) se puede contestar fácilmente esta pregunta. Aplicada primero a la mitad izquierda ACB y luego a la mitad derecha BDA del anillo. Y teniendo en cuenta que por simetría, la fem es igual a  $\frac{1}{2}\varepsilon$  a lo largo de cada mitad del anillo. La ecuación (1.10) genera las siguientes relaciones:

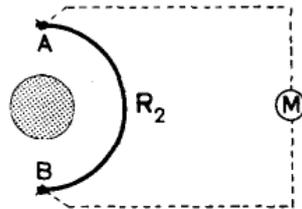
$$R_1 i = V_A - V_B + \frac{1}{2} \varepsilon \quad (1.11)$$

$$R_2 i = V_B - V_A + \frac{1}{2} \varepsilon \quad (1.12)$$

donde  $i$  es la corriente en el anillo. Sumando estas relaciones se llega a  $(R_1 + R_2)i = \varepsilon$ , que también se podría haber obtenido aplicando la ley (1.10) al anillo completo ACBDA. Combinando este resultado ya sea con (1.11) o (1.12) se tiene:

$$V_A - V_B = \frac{1}{2} \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right) \varepsilon$$

Si  $R_1 = R_2$  entonces  $V_A - V_B = 0$ . Pero, si  $R_1 \gg R_2$  entonces  $V_A - V_B = \frac{1}{2} \varepsilon$ . Este último resultado es físicamente más claro si se considera el caso donde solamente la mitad derecha BDA del anillo está presente (es decir,  $R_1 = \infty$ ) (ver figura 1.8).



**Fig. 1.8 Medio anillo metálico con una resistencia  $R_2$ , y con una diferencia de potencial inducido magnéticamente. La línea punteada indica la conexión de un voltímetro**

En esta mitad de anillo la fem inducida  $\frac{1}{2} \varepsilon$  llevaría cargas positivas desde B hasta A (o cargas negativas desde A a B) hasta que la acumulación de cargas genera una situación de equilibrio final y una diferencia de potencial  $V_A - V_B$  igual a  $\frac{1}{2} \varepsilon$ .

Un voltímetro es un caso particular de un sistema de dos terminales, que tiene una resistencia grande y un medidor  $M$  que indica la corriente pequeña que fluye a través de este sistema. De acuerdo a la ley de Ohm (1.10), la medida del voltaje indicada por el medidor del voltímetro depende tanto de fuerzas coulombianas y no coulombianas dentro del instrumento. Por lo tanto, el voltaje indicado por un voltímetro es igual a la diferencia de potencial  $\Delta V$  entre los terminales del voltímetro (incluyendo los cables de conexión) únicamente

cuando la fem en el voltímetro y sus cables es cero. En el caso más general, el voltaje indicado es igual a  $\Delta V + \mathcal{E}$ , es decir, al trabajo total por unidad de carga en movimiento a través del instrumento. Específicamente, el voltaje indicado por el voltímetro generalmente es *diferente* de la diferencia de potencial  $\Delta V$  entre los puntos a los cuales los cables del voltímetro están conectados. Además, ya que la fem  $\mathcal{E}$  está relacionada con el trabajo realizado por fuerzas no conservativas y por tanto es dependiente de la trayectoria, el voltaje indicado por el voltímetro generalmente depende de la configuración espacial del voltímetro y sus cables asociados.

## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA**

*“La inteligencia organiza el mundo organizándose a sí misma”  
(Piaget 1968)*

En este capítulo se presentan las hipótesis de la investigación, el marco teórico, el enfoque metodológico y los diseños experimentales.

En lo que concierne al marco teórico se aborda el significado y una breve historia del constructivismo, las premisas fundamentales de éste que orientan la investigación y los principales enfoques constructivistas que caracterizan las concepciones de los estudiantes y el aprendizaje de las ciencias.

En el enfoque metodológico se caracteriza la metodología fenomenográfica, enfatizando cómo se establecen las categorías de descripción para analizar las concepciones de los estudiantes. Además se presenta el modelo de argumento de Toulmin, como herramienta complementaria para analizar los argumentos de los estudiantes. Así mismo, se describe la metodología seguida para analizar libros de texto.

En el ítem de los diseños experimentales se presentan los cuestionarios y sus criterios de análisis, las preguntas de las entrevistas con sus criterios de análisis y los criterios y protocolo de análisis de los libros de texto.

#### **2.1 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

Dentro del problema objeto de este trabajo que hemos delimitado en forma de preguntas de la investigación (ver apartado 1.1.2), a continuación se presentan las hipótesis de investigación que hemos formulado a propósito de la primera y segunda preguntas de la investigación. Es necesario indicar que el fracaso que se da en la parte del currículo dedicado al electromagnetismo en general y al

concepto de fuerza electromotriz en particular, puede no deberse fundamentalmente a responsabilidades individuales de los estudiantes, sino a deficiencias en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Así pues, las dos hipótesis que se enuncian a continuación hacen referencia, por un lado, al posible fracaso de la enseñanza habitual en el aprendizaje del concepto de fem por estudiantes de primer curso universitario. Por otro, a la posible presentación deficiente del concepto en los libros de texto.

La primera hipótesis se centra en la ineficacia que revelaría la enseñanza habitual del concepto de fem en orden a favorecer un aprendizaje comprensivo de dicho concepto. Los síntomas principales de esta ineficacia serían el fracaso escolar y que la mayoría de los estudiantes presenten concepciones alternativas al concepto científico de fuerza electromotriz. Para indagar sobre el aprendizaje de los estudiantes nos cuestionaremos lo que se acepta como obvio y natural en el proceso de enseñanza-aprendizaje habitual. Es decir, que los estudiantes aprenden comprensivamente el concepto de fem cuando se les transmite un conjunto ordenado de leyes y conceptos dentro del marco de la disciplina. Aquí habría que recordar los excelentes resultados que ha dado el cuestionarse lo 'obvio' en la investigación científica para llegar a un mayor conocimiento.

La segunda hipótesis se centra en las posibles deficiencias en la presentación del concepto de fem en los libros de texto de nivel introductorio de electromagnetismo para la formación universitaria. Estas deficiencias están relacionadas con aspectos epistemológicos y con aspectos referidos a las estrategias de enseñanza utilizadas (aspectos didácticos). Será objeto del análisis de los libros de texto aspectos epistemológicos tales como tener en cuenta que los significados de los conceptos son parte esencial de las teorías que justifican la interpretación de los fenómenos naturales. Se tendrán en cuenta también aspectos didácticos como la consideración de explicaciones cualitativas y el tratamiento científico de los problemas que tengan en cuenta dificultades procedimentales (razonamiento de "sentido común", causalidad simple, inversión de la implicación causa-efecto... etc.), derivadas de la no utilización de los aspectos fundamentales de la metodología científica

(planteamiento cualitativo del problema, emisión de hipótesis, diseño y realización de experimentos, análisis de resultados...). Por último, se prestará atención en el análisis de los libros de texto a la presentación o no, de aspectos motivacionales (interacción Ciencia/Tecnología/Sociedad) que permitan despertar el interés hacia el concepto de fem, y caracterizándose, por lo tanto, por una visión contextualizada de la Ciencia

### **Hipótesis 1:**

*La enseñanza habitual del concepto de fuerza electromotriz tanto en el contexto de circuitos eléctricos como en el del fenómeno de inducción electromagnética en cursos universitarios de Física General no favorece el aprendizaje comprensivo de dicho concepto por parte de los estudiantes. En particular, la mayoría de los estudiantes universitarios de cursos introductorios de física presentarán concepciones alternativas al concepto científico de fuerza electromotriz una vez que han recibido instrucción sobre el tema.*

### **Hipótesis 2:**

*La presentación que se hace del concepto de fem en muchos libros de texto de Física General para la universidad muestra que frecuentemente no se tiene en cuenta los resultados de la investigación en enseñanza de la física, en particular las dificultades de aprendizaje de los estudiantes, y presentan ambigüedades o falta de exactitud en las explicaciones que dificultan la comprensión de este concepto.*

En la sección que viene a continuación justificamos las hipótesis emitidas.

## **2.2 MARCO TEÓRICO**

La Educación en Ciencias es un campo de investigación relativamente joven, cuyo interés está en problemas relacionados con la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias. En el centro de cualquier investigación en la Educación en Ciencias se encuentra el objetivo de mejorar el aprendizaje de los estudiantes y en consecuencia, el cambio o mejora de la enseñanza de las ciencias. A fines de los años cincuenta termina un largo período de estabilidad en los currículos de las materias científicas en la enseñanza de las ciencias; basado en el

modelo de transmisión-recepción centrado en los contenidos, con una ausencia casi total de trabajos experimentales, y acorde con una visión positivista de la ciencia (Gil 1986).

Durante los años sesenta y setenta, surgió un nuevo enfoque de la enseñanza de las ciencias conocido como “aprendizaje por descubrimiento”, en el que se concedía un papel fundamental a la familiarización de los estudiantes con los métodos de la ciencia. El principal objetivo de este enfoque era convertir al estudiante en un “pequeño científico” a través de prácticas de laboratorio que le permitieran practicar el método científico y así descubrir la teoría que se le quería dar a conocer. Algunos de los proyectos basados en el “aprendizaje por descubrimiento” fueron: PSSC, BSCS, CBA y CHEM (Hodson 1985). Una de las críticas más notables al aprendizaje por descubrimiento está en la sugerencia equivocada de que para alcanzar la comprensión de los procedimientos de la ciencia y la adquisición de conocimientos científicos se requiera que el estudiante sea puesto en situación de aprender el contenido a través del método (Hodson 1994).

Muchos de los intentos realizados en la educación en ciencias, mediante el aprendizaje por descubrimiento, sólo cumplieron parcialmente las buenas expectativas consideradas. En la década de los setenta, surgió un nuevo enfoque del aprendizaje por recepción de la información transmitida, basado en la teoría del aprendizaje significativo de D. P. Ausubel (2002). De acuerdo a esta perspectiva, los nuevos conocimientos se incorporan en forma sustantiva en la estructura cognitiva del alumno. Esto se logra cuando el estudiante relaciona los nuevos conocimientos con los anteriormente adquiridos, pero también es necesario que el alumno se interese por aprender lo que se le está mostrando. La propuesta de Ausubel rechaza la idea de que sólo se entiende lo que se descubre, ya que también puede entenderse lo que se recibe. “Un aprendizaje es significativo cuando puede relacionarse, de modo no arbitrario y sustancial (no al pie de la letra) con lo que el alumno ya sabe”. En este sentido, para lograr el aprendizaje de un nuevo concepto es necesario tender un puente cognitivo entre ese nuevo concepto y alguna idea de carácter más general ya presente en la mente del alumno; este puente cognitivo recibe el nombre de

organizador previo y consiste en una o varias ideas generales que se presentan antes de los materiales de aprendizaje (Ausubel 2002). Aunque en esta propuesta se puede percibir la importancia del dominio afectivo en el aprendizaje significativo, fue J. D. Novak (1988) quien profundizó este aspecto, y desarrolló un instrumento de gran éxito en el aula: los “mapas conceptuales”. Este instrumento puede usarse como recurso didáctico, de evaluación y de análisis del currículo (Moreira 2003) y también puede servir como instrumento de metacognición (Novak y Gowin 1988).

Aunque el cambio de orientación en la enseñanza de las ciencias por transmisión-recepción, basada en el “aprendizaje significativo” de Ausubel, había logrado resultados positivos parciales, hacia finales de los setenta, la persistencia de graves errores conceptuales en los estudiantes de cualquier nivel educativo (Pfundt y Duit 1998), ponía en evidencia las dificultades de la práctica docente y cuestionaba enfoques como los que se han nombrado aquí. En este contexto surge la teoría del aprendizaje conocida como Constructivismo, que es el marco teórico desde el que se asume esta investigación. Es de notar que como en cualquier otro campo científico, el Constructivismo no ha tenido un desarrollo lineal, y en él se han producido y siguen produciéndose fecundas controversias y reorientaciones más o menos profundas, pero ha mostrado convergencias y progresos reales en la orientación del proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias, refrendados por un notable volumen de investigaciones e innovaciones que pueden consultarse en las numerosas revistas especializadas existentes (Gil et al. 1999, Anderson 2008). El Constructivismo se ha convertido en una importante orientación para la educación en ciencias, tanto para su enseñanza como para la investigación en ese campo. En particular, nos interesa aquí como un referente para analizar cómo los estudiantes construyen significado y conocimiento de algunos conceptos y leyes de la teoría electromagnética.

### **2.2.1 Significado y Breve Historia del Constructivismo**

Como se señaló, nuestro interés aquí es el Constructivismo en Educación en Ciencias, en particular en su aprendizaje y su enseñanza. Pero es necesario

hacer algunas precisiones porque el término constructivismo es usado en diferentes campos y con diversos significados. Se emplea en artículos académicos, en libros dirigidos a la formación de profesores, en el desarrollo y evaluación de currículos, entre otros; y muchas veces no se ofrece una definición clara de su sentido. Muchos críticos dicen que la etiqueta “enseñanza constructivista” es usada por muchos autores como casi sinónimo de una enseñanza centrada en el estudiante, basada en la indagación, o el descubrimiento o alguna clase de participación activa de los alumnos; pero con poca precisión sobre la definición del término aunque se asocia con algo sin duda positivo. También es considerable la variedad de perspectivas desde las que se piensa el constructivismo; aunque la lista puede ser muy larga se mencionan unas pocas. Algunos investigadores hacen una clasificación entre constructivismo *individual y cognitivo* (frecuentemente con referencia a Jean Piaget (1896-1980) y constructivismo *social* (frecuentemente con referencia a Lev Vygotsky (1896-1934)). Otras versiones ampliamente usadas son constructivismo *contextual* (Cobern 1991), constructivismo *sociotransformativo* (Rodríguez 1998), y constructivismo sociocultural (Branco y Valsiner 2004). De acuerdo a lo expresado, es necesario clarificar aquí el sentido que se le da al Constructivismo ya que no existe total consenso en cuál es su estatus epistemológico y teórico (Sjoberg 2007).

Si se considera el Constructivismo como una teoría del aprendizaje, cabe preguntarse ¿cómo los estudiantes construyen significados y conocimiento? Es de señalar que esto difiere de la epistemología del conocimiento científico, es decir, del crecimiento, desarrollo y estatus del conocimiento científico acerca del mundo. Así, es pertinente preguntar ¿qué es construido?:

- (i) ¿Cada individuo construye su propio conocimiento?
- (ii) ¿El conocimiento científico se construye socialmente?
- (iii) ¿El mundo es socialmente construido?

La primera pregunta es un problema que está en el campo de la educación y de la psicología. Mientras que (ii) y (iii) son parte de la filosofía y de la epistemología. La segunda pregunta también está dirigida a la sociología del conocimiento y a la sociología de la ciencia. Analíticamente, es importante

mantener estas preguntas separadas, ya que se puede apoyar las teorías del aprendizaje constructivistas (implícitas en la pregunta (i)), y no compartir las posturas que subyacen a las preguntas (ii) y (iii); en particular la última por tender a una postura relativista del conocimiento. Se evitan muchas confusiones si se mantiene en mente las diferencias fundamentales de estas tres preguntas (Sjoberg 2007).

Para precisar el sentido que se le da aquí al Constructivismo, es relevante dar una breve mirada en el desarrollo histórico de las ideas constructivistas en educación. En particular se aborda el cómo estas ideas emergieron con un énfasis en el campo de la educación en ciencias.

Una de las principales influencias que está a la base del surgimiento del constructivismo es el trabajo de Piaget, en gran parte llevado a cabo en la primera mitad del siglo XX. Muchos de sus ejemplos del desarrollo intelectual vienen de observaciones y entrevistas clínicas con niños cuando ellos manipulaban objetos físicos, técnicos o químicos en experimentos sencillos. Posiblemente la formación en biología de Piaget (PhD en biología), el uso reiterado de ejemplos de física y la tecnología, así como su deseo de formular teorías generales de un modo matemático puede explicar por qué se recurre extensamente a la teoría piagetiana por parte de los educadores en ciencias y matemáticas; el campo donde él ha tenido más influencia es en educación. Esto último es un poco paradójico, porque aunque su trabajo cubrió varias disciplinas académicas, él no fue un educador, y escribió muy poco sobre enseñanza y pedagogía.

Básicamente, el problema de investigación de Piaget fue el mismo todo el tiempo. Su problema era epistemológico y filosófico: ¿cuál es la naturaleza del conocimiento? y ¿cómo crece y se desarrolla? Este fue el problema que orientó el trabajo de la institución que creó en Ginebra en 1955, “Centro Internacional de la Epistemología Genética”. Nótese que “genética” se refiere a la génesis y desarrollo del conocimiento, y no a herencia biológica. De acuerdo a Piaget, la naturaleza del conocimiento debe ser estudiado empíricamente donde realmente se construye y desarrolla. Esto se puede hacer o a través del desarrollo histórico del conocimiento, como se halla en las ciencias bien

establecidas (en particular la física y la matemática), o se puede estudiar en el crecimiento y desarrollo de un individuo.

Los primeros escritos de Piaget, de la década de 1920, fueron sobre las concepciones que los niños tienen del mundo. En este tiempo comenzó a usar el término constructivismo, al titular un libro (que posteriormente fue muy influyente) *“La Construcción de la Realidad en el Niño”*. Como puede verse, Piaget dio significado al término constructivismo mucho antes de que fuese usado por académicos en otros campos. Él se mantuvo fiel a su perspectiva constructivista a través de su larga actividad académica. En su última publicación, resumió su programa de trabajo de toda la vida:

*“Establecer lo que hemos llamado una teoría **constructivista** del conocimiento y, al mismo tiempo, refutar las teorías empiristas e innatistas. El problema esencial de una teoría del conocimiento es: ¿Cómo se construye el nuevo conocimiento? ¿Es, como los contenidos empíricos, siempre derivados de la realidad observada, o es preformado en la mente humana, y por lo tanto innato? Incluso en nuestro primer trabajo, yo creo, se mostraron claramente las insuficiencias de las teorías empiristas y preformistas (1980)”*  
(citado por Sjoberg 2007, p. 5)

Como se puede apreciar, Piaget sitúa su epistemología constructivista. Rechaza las posturas empiristas y conductistas de que el conocimiento se deriva directamente de las experiencias sensibles. También rechaza la visión racionalista o preformista de que el conocimiento es innato y se desarrolla más o menos biológicamente a medida que los individuos crecen y maduran.

Las teorías de Piaget fueron descubiertas por los educadores en ciencias a comienzos de los años setenta. Él describió un proceso de aprendizaje interactivo mediante el cual un individuo hace sentido del mundo a través de esquemas cognitivos, los cuales son modificados como un resultado de las acciones individuales sobre los objetos en el mundo. Enfatizó el significado del ambiente social del niño para desarrollar el conocimiento (Piaget 1969a). Sin embargo, en muchos escritos de Piaget el conocimiento es retratado como esquemas en la mente del individuo, dando poca importancia a aspectos sociales más amplios. El mecanismo que propone para explicar los cambios en la organización intelectual como un resultado de las interacciones con el mundo involucra los procesos de asimilación (proceso mediante el cual un individuo interpreta información sensible particular y así la incluye en su estructura

cognitiva existente) y acomodación (proceso mediante el cual la estructura cognitiva se adapta para darle sentido a información específica) (Piaget 1969b). Asimilación y acomodación no pueden ser disociados: siempre que un individuo interactúa con información sensoria, ambos procesos toman lugar.

Piaget basado en su trabajo empírico que abordaba el desarrollo del conocimiento de los niños acerca de diversos aspectos del mundo natural, propuso considerar el cambio conceptual fruto del desarrollo de estructuras lógicas independientes del contenido. Estableció etapas características en el desarrollo del pensamiento lógico, basado en las habilidades de los estudiantes para desempeñar tareas que involucraban tales habilidades (Piaget y Inhelder 1956).

Inicialmente se le prestó mucha atención a su teoría de los estadios del desarrollo intelectual que cada individuo pasa. Pero, aunque esta postura teórica y los proyectos curriculares que inspiró dieron un ímpetu positivo a la educación en ciencias, fue perdiendo partidarios y disminuyó en popularidad. Más importante, sin embargo, probablemente fueron los nuevos y prometedores desarrollos que vinieron luego.

El punto de partida para lo que ahora se llama Constructivismo en la educación en ciencias, se puede ubicar en el año 1978 con la publicación del artículo "*Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students*" de R. Driver y J. Easley. En esta publicación, se revisó la investigación sobre las ideas y percepciones de los niños con respecto a los fenómenos naturales, y se propuso un lenguaje y una perspectiva teórica para hablar acerca de los hallazgos y sus aspectos educativos. La perspectiva de estos autores fue fuertemente influida por la teoría piagetiana, y generó un interés nuevo por los contenidos existentes en las ideas de los niños. En particular, anclaron sus interpretaciones a la epistemología constructivista de Piaget, así como a sus primeros estudios de las ideas de los niños. Es decir, en este artículo se aborda el rol activo de los estudiantes en la construcción de su propio conocimiento, y se asigna un significado y un estatus preponderante a sus ideas (Taber 2006).

En los siguientes años, la agenda de la investigación en ciencias cambio gradualmente. Hubo una creciente preocupación por las ideas que los niños desarrollan acerca de los fenómenos en el mundo físico, y el término constructivismo se volvió de uso frecuente. La publicación reiterada de artículos, así como de libros (Driver et al. 1989, Driver et al. 1994) dirigidos a apoyar el trabajo de los profesores en el aula; probablemente es una de las principales razones que ha hecho que las ideas del constructivismo se hayan vuelto altamente influyentes, siendo el principal referente conceptual para explorar el aprendizaje en ciencias, no sólo en la investigación, sino también en la formación de profesores y en las aulas de ciencias. Es notable, la extensa investigación llevada a cabo acerca de las ideas y razonamientos de los alumnos en ciencias (Duit 2009); y el alto grado de consenso, entre los investigadores, en el modo en que diferentes temáticas de las ciencias, comúnmente pueden ser entendidas por los estudiantes de diferentes edades.

Otra influencia importante en el origen del Constructivismo en la educación en ciencias, fue la teoría de la personalidad del psicólogo G. Kelly publicada en 1955, conocida como “teoría del constructo personal”. Él describió su perspectiva como *constructivismo alternativo*, que enfatiza la idea de que si existe una sola realidad verdadera, la realidad siempre se experimenta desde una u otra perspectiva o construcción alternativa, es decir, el conocimiento de un individuo es provisional. En otras palabras, cada individuo necesita encontrar la similitud entre un acontecimiento y otros, al mismo tiempo que los distingue. Esto es en esencia construir un acontecimiento, darle significado, asimilarlo (en términos piagetianos). De hecho, según Kelly, la actividad básica del ser humano es dar significado a los acontecimientos para poder anticiparlos (Kelly 2001).

A propósito de las ideas de los estudiantes, son muchos los nombres que se han usado para referirse a ellas; la literatura reporta: ideas de los estudiantes, sus paradigmas alternativos, mini teorías, concepciones, concepciones erróneas, etc. Esta variedad en terminología, por un lado revela que diferentes investigadores entienden e interpretan sus hallazgos desde diferentes perspectivas teóricas; por otro lado, refleja ambigüedad y algo de confusión

acerca del estatus de lo que se ha observado. Esto, por supuesto, tiene implicaciones en el cómo actuar sobre tales observaciones. Si un profesor o investigador se enfrenta a una concepción errónea, simplemente se buscará corregir lo que no está bien entendido. Si, de otra manera, las explicaciones de los estudiantes tienen el carácter de ser un paradigma, un modo alternativo de ver el mundo, bien integrado con otras creencias fuertemente enraizadas, entonces la tarea educativa realmente es muy diferente.

No obstante, el estatus de las ideas que los estudiantes expresan realmente puede diferir de un tipo de fenómeno a otro, y esto es una cuestión empírica que puede ser clarificada por la investigación. En el caso de la física, en muchos casos se ha encontrado que las ideas expresadas son muy dispersas, frecuentemente ad hoc (Driver et al. 1994b, Viennot 2002, Montero 2007). Para otros fenómenos, las explicaciones de los estudiantes están más profundamente enraizadas, bien integradas, y usadas sistemáticamente para entender una amplia clase de experiencias. En este caso, ellas pueden ser muy resistentes al cambio, lo que supone una tarea muy difícil el tratar de modificarlas.

Las investigaciones sobre las ideas de los estudiantes, desde la perspectiva teórica del constructivismo proliferan desde los comienzos de los ochenta. R. Duit en el “German Institute for Science Education” en Kiel, mantuvo una bibliografía sobre tales estudios hasta el año 2009 (por considerar innecesario continuarla). Duit introduce su lista de artículos con estas palabras: “La bibliografía intenta documentar la investigación sobre enseñanza y aprendizaje de las ciencias con énfasis en la investigación desde las perspectivas constructivistas. Se le da particular atención al rol de diferentes concepciones de estudiantes y profesores en el proceso de enseñanza y aprendizaje” (Duit 2009). Esta bibliografía incluye cerca de 8400 artículos de investigación, un indicio claro de que esta es una perspectiva dominante en la investigación en educación en ciencias.

Hasta ahora se ha hecho énfasis en la influencia de Piaget, que es evidente en casi todos los escritos referentes al constructivismo, especialmente en las primeras fases. Una de las principales críticas a muchos de los trabajos

emprendidos en la perspectiva piagetiana del constructivismo en la educación en ciencias, ha sido el que se considere al estudiante como un individuo aislado construyendo su conocimiento personal en un vacío social, es decir, sin considerar la muy real influencia de las otras personas en el proceso de aprendizaje (Taber 2006). Sin embargo, la importancia de las interacciones sociales fue reconocida desde el comienzo (Driver y Easley 1978), aun si la atención se enfocó inicialmente en otra parte.

En el artículo "*Constructing Scientific Knowledge in the Classroom*" (Driver et al. 1994a), se presentó una perspectiva sobre el aprendizaje en ciencias considerando tanto la visión individual como social, recurriendo a ejemplos ilustrativos de prácticas en el aula. Se enfatiza que el desarrollo del conocimiento científico no sólo está limitado a los datos empíricos, sino también está socialmente validado por la comunidad científica y va más allá de consideraciones descriptivas del mundo natural. Por lo tanto, el conocimiento científico no sólo puede ser aprendido de experiencias sensibles. Las visiones individual y social del aprendizaje pueden ser útiles para que los profesores de ciencias y los investigadores demos cuenta de cómo aprenden los estudiantes inmersos en procesos de enseñanza en contextos formales como la educación universitaria.

Desde la publicación del artículo de 1994, se ha publicado bastante acerca de la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia teniendo en cuenta las visiones individual y social. Esto explica por qué ahora se tienen diversos enfoques constructivistas. La principal influencia de la perspectiva social del constructivismo ha sido de un contemporáneo de Piaget, el ruso L. Vygotsky.

Aunque muchos libros se han escrito donde estos dos pensadores son vistos más o menos como opuestos puede ser más productivo indicar algunas semejanzas fundamentales (Sjoberg 2007). Ambos pueden ser considerados como constructivistas. Algunas diferencias entre los dos se pueden explicar por el hecho de que sus agendas de investigación eran diferentes. Mientras Piaget estaba interesado en epistemología y conocimiento de por sí, Vygotsky estaba más interesado en entender las condiciones social y cultural para el aprendizaje humano (Vygotsky 2001). En este sentido, sus escritos eran más

cercanos a las preocupaciones de los educadores. Debido al énfasis en lo social y en la naturaleza colaborativa del aprendizaje Vygotsky frecuentemente es considerado el padre del constructivismo social, mientras que Piaget frecuentemente se le considera el padre del constructivismo individual o cognitivo. Los dos autores proporcionan caminos diferentes hacia el constructivismo (Pass 2004).

Específicamente, Vygotsky es un punto de referencia teórico fundamental para las perspectivas constructivistas sociocultural y social acerca del aprendizaje. En su visión es central la idea de que el aprendizaje involucra un paso desde contextos sociales a la comprensión individual. En sus palabras *“el aprendizaje despierta una variedad de procesos de desarrollo interno que sólo son capaces de operar cuando el niño está interactuando con personas en su ambiente y en cooperación con sus pares. Una vez estos procesos son internalizados, ellos se vuelven parte del desarrollo independiente del niño”* (Vygotsky 1978, p. 35). Así, hay una transición desde el *plano social* al *plano individual*, mediante la cual las herramientas sociales para la comunicación se *internalizan* y proporcionan los medios para el pensamiento individual.

Entonces, el origen social del aprendizaje es fundamental y parte integral de la visión de Vygotsky. De este modo, el trabajo del profesor es hacer disponible el conocimiento científico en el plano social del aula, apoyando a los estudiantes en su proceso de darle sentido a ese conocimiento. Vygotsky juntó las actividades de enseñanza y aprendizaje por medio de su concepto de zona de desarrollo próximo o ZDP. La ZDP *“es la distancia entre el nivel de desarrollo actual determinado mediante la resolución independiente de problemas (por parte del individuo) y el nivel de desarrollo potencial determinado a través de la resolución de problemas bajo la guía de un adulto o en colaboración con pares más capaces”* (Vygotsky 1978, p. 33). El punto claro aquí es que el aprendizaje del estudiante se concibe como directamente conectado y dependiente de la actividad de apoyo del profesor en el plano social (Scott et al. 2008).

### **2.2.2 Premisas Fundamentales del Constructivismo que Orientan esta Investigación**

Como se ha señalado anteriormente, el Constructivismo es una perspectiva dominante en el campo de la educación en ciencias. Cabe preguntarse ¿qué tan profunda es esta influencia? Algunos autores se refieren a su influencia describiendo el Constructivismo como un paradigma en el sentido kuhniano (Kuhn 1975), es decir, una cierta tradición de hacer investigación en una rama particular de la ciencia desarrollada sobre la base de una nueva teoría. Incluye nuevos conceptos teóricos, nuevos instrumentos, técnicas experimentales específicas, un acercamiento particular a la solución de problemas, y nuevas aplicaciones. Otros autores se refieren a la influencia del Constructivismo haciendo uso de la categoría *programa de investigación científica* de Lakatos (1982), propuesta como una metodología para analizar la historia del crecimiento del conocimiento en las ciencias naturales, y que Taber (2006) aplica a una ciencia social: la ciencia de la educación. La metodología de los programas de investigación proporciona una herramienta analítica que permite hacer juicios acerca de la viabilidad de tradiciones investigativas. En el caso del Constructivismo en educación en ciencias considerado como un programa de investigación proporciona una perspectiva para apreciar holísticamente esta área de investigación.

Asumiendo la idea de Sjoberg (2007), el término paradigma en el sentido kuhniano parece un poco excesivo. Un paradigma se supone tan consolidado que domina completamente un campo o disciplina (como el paradigma de campos en física). Por lo tanto, el término *programa de investigación* parece más apropiado. La investigación en el marco del Constructivismo en la educación en ciencias en general se ha enfocado en las ideas y aprendizaje de los individuos. La complejidad del fenómeno estudiado (el aprendizaje), y los temas prácticos y éticos relacionados con el trabajo con los estudiantes, frecuentemente ha requerido acercamientos que involucran estudios profundos de pequeñas muestras de voluntarios dispuestos, por investigadores que están íntimamente involucrados en la construcción de datos, por ejemplo a través de entrevistas. Esto significa que los resultados de la investigación no pueden ser presentados como completamente objetivos o representativos, y las diferencias

individuales entre alumnos no permite modelos que abarquen todo y sean de aplicabilidad universal. Sin embargo, el Constructivismo en educación en ciencias es un programa que busca desarrollar modelos que sean útiles para la enseñanza de las ciencias, y por lo tanto es una actividad normativa (Lakatos 1982, Taber 2006).

De manera breve, un programa de investigación es un conjunto de ideas que proporcionan una plataforma de supuestos comunes e ideas acerca de cierto fenómeno, que son aceptados como fundamentales para el programa. En la terminología de Lakatos estos supuestos se conocen como el *núcleo duro* o *firme* (aquí premisas fundamentales). Este núcleo firme está protegido por un cinturón protector que consiste en un conjunto de teorías auxiliares que pueden ser modificadas, eliminadas o reemplazadas por otras nuevas, pero siempre manteniéndose fiel al *núcleo firme* del programa. Para que el programa de investigación progrese es necesario avanzar en el desarrollo de sus teorías auxiliares, pero no de una manera puramente ad hoc para arreglar una relación con los nuevos hallazgos, sino también para proporcionar nuevas predicciones que puedan ser corroboradas empíricamente (Taber 2006). Lakatos afirma que establecer un programa de investigación progresivo puede “tomar décadas”.

Entonces, en el caso del Constructivismo en la educación en ciencias, si se considera que es un programa de investigación debe ser posible identificar un *núcleo firme* de supuestos básicos. Efectivamente, hay algunos principios que se podrían considerar axiomáticos por aquellos quienes han estado involucrados en el programa del Constructivismo en educación en ciencias (Fredette y Lochhead 1981, Posner et al. 1982, Osborne y Wittrok 1985, Shuell 1987, Driver 1986 y 1989, Pintrich et al. 1993, Wandersee et al. 1994, Taber 2006) son:

a) *El conocimiento es construido por el alumno, no recibido.*

Esta es la esencia de la posición constructivista. Vale la pena notar que esta afirmación, en sí misma, no hace comentarios sobre la medida en que el conocimiento se construye, o si podría representar alguna realidad externa.

b) *Los alumnos llegan a aprender ciencias teniendo ideas sobre muchos fenómenos naturales.*

Esta afirmación está claramente apoyada por el amplio corpus de investigación sobre las ideas de los alumnos, que muestra que el conocimiento previo que tienen los estudiantes es relevante en muchas temáticas de la ciencia.

c) *Las ideas existentes en los alumnos tienen consecuencias para el aprendizaje de la ciencia.*

Esta afirmación proporciona la justificación para investigar las ideas de los estudiantes en el contexto de la investigación en educación en ciencias. Como el conocimiento es construido, la estructura del conocimiento existente actúa como el punto de partida del aprendizaje ulterior.

d) *Es posible enseñar ciencias de manera más efectiva si se tienen en cuenta las ideas existentes en el alumno.*

Aunque no toda investigación dentro del programa podría tener una conexión explícita con la enseñanza se espera que el cuerpo completo de conocimiento apoye a la pedagogía.

e) *El conocimiento es representado en el cerebro como una estructura conceptual.*

De algún modo el cerebro de un alumno es capaz de representar la información de un modo estable y no aleatorio.

f) *Es posible modelar las estructuras conceptuales de los estudiantes.*

Se supone que se pueden modelar (re-re-presentar) estas re-presentaciones (sic) en algún modo que puede ser útil para apoyar la enseñanza.

g) *La estructura conceptual de cada individuo es única.*

Es importante estudiar en detalle las ideas de los alumnos, las cuales surgen de sus experiencias personales de eventos naturales y de su intento por darles sentido a ellas por sí mismos, haciendo uso de estudios ideográficos donde el enfoque está en las experiencias personales de los individuos.

Estas premisas fundamentales del programa de investigación Constructivismo en educación en ciencias, implican un conjunto de preguntas de investigación generales para éste. La tabla 2.1 presenta los axiomas junto a las áreas relevantes de actividad investigativa implicadas por cada axioma:

**Tabla 2.1 Relación entre los axiomas y las preguntas de investigación**

<b>Supuestos axiomáticos (núcleo firme)</b>	<b>Preguntas generales de la investigación</b>
a) El conocimiento es construido por el alumno, no recibido	¿Cómo se lleva a cabo la construcción del conocimiento (es decir el aprendizaje)?
b) Los alumnos llegan a aprender ciencias teniendo ideas sobre muchos fenómenos naturales	¿Qué ideas llevan los alumnos al aula de ciencias, y cuál es la naturaleza de estas ideas?
c) Las ideas existentes en los alumnos tienen consecuencias para el aprendizaje de la ciencia	¿Cómo interactúan las ideas de los alumnos con la enseñanza?
d) Es posible enseñar ciencias de manera más efectiva si se tienen en cuenta las ideas existentes en el alumno	¿Cómo deberían los profesores (“constructivistas”) enseñar ciencias teniendo en cuenta los axiomas (a)-(c)?
e) El conocimiento es representado en el cerebro como una estructura conceptual	¿Cómo se organiza el conocimiento en el cerebro?
f) Es posible modelar las estructuras conceptuales de los estudiantes	¿Cuáles son los modelos y representaciones más apropiadas?
g) La estructura conceptual de cada individuo es única	¿Cuánto en común hay entre las ideas de los alumnos en ciencias?

Esta investigación se desarrolla teniendo como marco las premisas (a), (b), (c) y (g), así como sus correspondientes preguntas generales. Como el constructivismo en enseñanza de las ciencias es acerca del aprendizaje en ciencias, trabajar en este programa de investigación implica ser constructivista en términos de su punto de vista de cómo se da el aprendizaje de los estudiantes. Este compromiso con el núcleo firme es crítico para identificarse con el programa. La perspectiva constructivista comúnmente supone la mediación social como clave para aprender una versión de la ciencia que coincide con el conocimiento científico. Así, los profesores guían el “descubrimiento” de ideas científicas mediante la gestión del conocimiento común en el aula, proporcionando andamios adecuados para dar forma a las construcciones de los estudiantes (Scott 1998), y ayudando a los estudiantes a

re-crear las entidades de la ciencia previamente construídas por los científicos profesionales (Ogborn et al. 1998).

Una de las críticas al Constructivismo en educación en ciencias es porque supuestamente está fundado en una visión relativista del conocimiento. Es posible que esta crítica a este programa de investigación, se deba a la importancia que se le da a las ideas de los estudiantes, esto implica que es necesario precisar la relación de las ideas de los alumnos con la ciencia como un cuerpo de conocimiento consensuado. Las concepciones de la ciencia de los estudiantes gozan de un estatus considerable en el constructivismo en enseñanza de las ciencias, pero ese estatus está relacionado con el significado educativo de esas ideas, y no debería ser considerado como evidencia de relativismo. La importancia asignada a las ideas de los estudiantes se debe a su valor potencial para informar a la pedagogía (Leach y Scott 2002), y no indica que estas “concepciones científicas alternativas” sean vistas como ciencia formal alternativa válida. El Constructivismo en educación en ciencias es, ante todo, un programa generando conocimiento encaminado a mejorar la enseñanza, de tal manera que los profesores de ciencias puedan facilitar de manera más efectiva el aprendizaje de la ciencia *prescrita*. Esta ciencia prescrita es el conjunto de representaciones o modelos de la ciencia en el currículo, con los cuales se pretende reflejar los modelos de la ciencia misma (Taber 2006). Estos modelos no necesariamente tienen que ser considerados auténticos reflejos de la ciencia “profesional” (Taber 2003), pero no obstante proporcionan un conocimiento objetivo muy definido.

Las investigaciones sobre esquemas conceptuales alternativos de los estudiantes permiten establecer un conocimiento detallado de cuáles son sus preconcepciones en cada dominio. Este conocimiento es imprescindible para poder hacer un adecuado planteamiento de situaciones concretas de aprendizaje, para proporcionar herramientas conceptuales para ser usadas por los profesores cuando piensan acerca de la enseñanza (noción que necesitan ser desafiadas y dónde colocar énfasis), e identificar y desarrollar objetivos específicos de currículo. Así mismo, un interés principal del estudio de los esquemas alternativos es contribuir a la elaboración de nuevas

orientaciones en el aprendizaje de las ciencias; y en este caso particular en el aprendizaje de la teoría electromagnética (Scott, Asoko y Leach 2008, Guisasola et al 2012).

### **2.2.3 Enfoques Constructivistas para Caracterizar las Concepciones de los Estudiantes y el Aprendizaje de las Ciencias**

Hay muchas preguntas que se pueden plantear acerca de cualquier evento de aprendizaje en ciencias. Por ejemplo, cuando un estudiante ha abordado en su clase de electromagnetismo el concepto de fuerza electromotriz (o cualquier otro concepto) se puede decir que ha aprendido algo acerca de ese concepto. Cabe preguntarse: ¿cómo se puede conceptualizar lo que le ha sucedido al estudiante en estas lecciones particulares?, ¿qué significa afirmar que el estudiante ha aprendido algo acerca del concepto de fem?, ¿qué factores influyeron en su aprendizaje?, ¿qué sucedió con las ideas previas del estudiante al abordar el nuevo concepto?, ¿por qué se espera que el estudiante encuentre algunas de las ideas relacionadas con el concepto de fem extrañas y difíciles de entender?

En los últimos 40 años se han desarrollado diferentes tendencias en el modo en que la investigación sobre las concepciones de los estudiantes y el aprendizaje de las ciencias se ha llevado a cabo. Entre algunos de los enfoques existen diferencias significativas y fundamentales. También está el caso de diferencias surgidas porque se abordan diferentes aspectos del proceso de aprendizaje, en este sentido algunos enfoques ofrecen perspectivas potencialmente complementarias.

Consideramos que dada la complejidad de lo que sucede en las aulas mientras los estudiantes aprenden ciencias, es poco realista esperar que una gran teoría pueda capturar toda esa actividad. En este sentido coincidimos con Scott, Asoko y Leach (2008), en elaborar lo que se podría considerar una perspectiva complementaria sobre el aprendizaje. Para ello, a continuación se presentan diferentes modos constructivistas de concebir el aprendizaje de las ciencias, y luego se caracteriza la perspectiva complementaria del aprendizaje, que es el marco desde el que se concibe este trabajo.

De acuerdo a lo presentado en el apartado 2.2.1, existe una tendencia a caracterizar el aprendizaje conceptual en ciencias, que va desde la perspectiva orientada individualmente de Piaget hacia aquellas perspectivas que reúnen lo individual con lo social. Dada la serie de enfoques para conceptualizar el aprendizaje de las ciencias, esta presentación se hace teniendo en cuenta dos dimensiones. La primera dimensión, se basa en dos perspectivas fundamentalmente diferentes (en naturaleza ontológica) del aprendizaje. Una perspectiva concibe el aprendizaje como *adquisición* de algo. Esta idea implica que los conceptos y teorías que se aprenden son almacenados en la cabeza del aprendiz. La otra perspectiva concibe el aprendizaje como *participación*. Aprender un tema es un proceso que implica volverse miembro de una cierta comunidad. La segunda dimensión considera la distinción entre las perspectivas del aprendizaje *individual* y *social*.

#### **a. Perspectivas cognitivas. Aprendizaje de la ciencia como adquisición**

Estos enfoques consideran el aprendizaje de la ciencia como un proceso de adquisición y se enfocan en el individuo para ofrecer una consideración de ese aprendizaje. Básicamente se fundamentan en el reconocimiento de la influencia en el aprendizaje del conocimiento previo del estudiante (Ausubel 2002), en las ideas piagetianas de acomodación y asimilación, y en el trabajo de la filosofía de la ciencia (Kunh 1975, Lakatos 1982).

Un artículo fundamental de las perspectivas cognitivas es de Posner, Strike, Hewson y Gertzog (1982) sobre el cambio conceptual en el aprendizaje de la ciencia. Ellos consideran que las condiciones necesarias para un cambio en el pensamiento dentro de un campo científico son análogas a las condiciones necesarias para el proceso de acomodación o cambio conceptual en cada estudiante. Identificaron cuatro condiciones que son necesarias para propiciar cambio conceptual:

- (i) El alumno debe sentir insatisfacción con las concepciones existentes.
- (ii) Una nueva concepción debe ser inteligible.
- (iii) Una nueva concepción debe aparecer inicialmente plausible.

- (iv) Una nueva concepción debe sugerir la posibilidad de un programa de investigación fructífero.

Posner et al. (1982) suponen que el aprendizaje es una actividad racional. Aunque reconocen, pero sin profundizar en este sentido, que las variables motivacional y afectiva son importantes en el proceso de aprendizaje. También reconocen que el proceso de acomodación puede tomar mucho tiempo.

Un punto significativo de confusión en los enfoques basados en el cambio conceptual tiene que ver con los diferentes significados que se le asignan a la expresión “cambio conceptual” (Scott et al. 2008):

- Algunas veces *cambio conceptual* se refiere al proceso de aprendizaje.
- Algunas veces *cambio conceptual* se refiere a los productos del aprendizaje.
- Algunas veces *cambio conceptual* se refiere a situaciones donde un concepto es *intercambiado* por otro
- Algunas veces *cambio conceptual* se refiere a situaciones donde un concepto es *modificado* de algún modo.
- Algunas veces *cambio conceptual* se refiere a situaciones donde la *relación* entre conceptos cambia.
- Algunas veces *cambio conceptual* se refiere a situaciones donde nuevos conceptos son *añadidos* sin perder las ideas originales (enriquecimiento de una estructura conceptual).

El interés en las concepciones alternativas de los estudiantes en la década de los 80 llevó a considerar el cambio conceptual revolucionario, con nuevas ideas reemplazando las originales (proceso de intercambio) más que cambios graduales.

¿Qué cambia durante el cambio conceptual? Carey (1987) en un estudio de caso sobre la adquisición de conocimiento de biología por parte de niños, propone dos formas de reestructurar el conocimiento en el aprendizaje. La primera forma, reestructuración “débil”, se caracteriza porque las relaciones entre los conceptos son modificadas. En la segunda, reestructuración “fuerte”,

cambian los conceptos; esta forma se considera difícil de lograr. En el contexto del aprendizaje de los conceptos de la física se ha dado considerable atención a la reestructuración radical.

Una serie de investigadores ha propuesto argumentos persuasivos a favor de la idea de que el aprendizaje se produce en la medida que conceptos discretos se forman y luego se vinculan a estructuras conceptuales más complejas. Esto ha dado paso a una visión de que los conceptos son parte de una estructura relacional más grande desde el comienzo (Scott et al. 2008). Vosniadou (1994) argumenta que los conceptos están integrados en dos tipos de estructuras teóricas. Por un lado están las *teorías marco ingenuas* acerca del mundo físico, construidas por los individuos desde la primera infancia. Proporcionan los presupuestos fundamentales ontológicos y epistemológicos que constriñen el proceso de adquisición de conocimiento en el dominio de la física. Por otro lado están, las *teorías específicas* formadas por un conjunto de creencias que describen las propiedades y el comportamiento de objetos físicos de un dominio conceptual dado. Se generan por medio de la observación o son transmitidas por la cultura bajo los constreñimientos de la teoría marco, lo que implica que las teorías específicas están integradas dentro de las teorías marco. Por ejemplo, la afirmación “el calor se puede transferir de un objeto a otro que está menos caliente por contacto directo” es una creencia de una teoría específica acerca de la transferencia de calor. Esta creencia está constreñida por la presuposición subyacente “el calor es una propiedad transferible de los objetos físicos” que es parte de una teoría marco de la física ingenua.

La distinción entre *teorías marco* y *teorías específicas* es una propuesta de algunos psicólogos del desarrollo (Vosniadou 2002), siguiendo una distinción similar a la de la historia de las ciencias entre paradigmas (o programas de investigación) y teorías específicas (Kuhn 1975, Lakatos 1982). El término *teoría* es usado aquí con relativa libertad para distinguir un cuerpo coherente de conocimiento que implica la comprensión causal y explicativa en comparación con un cuerpo de conocimientos que implica una colección de hechos y algunos procedimientos para operar sobre ellos. Se asume que las

teorías del conocimiento común son diferentes de las teorías científicas ya que a las primeras les faltan muchas características importantes de las teorías científicas, tal como la sistematicidad y abstracción.

Las teorías marco y específicas constituyen la base de la generación de modelos mentales específicos en respuesta a las demandas de una situación particular. De acuerdo con la perspectiva de Vosniadou, la forma más simple de cambio conceptual es el enriquecimiento de una estructura conceptual existente. Y la forma más difícil, es la revisión de las creencias o de los presupuestos ontológicos y epistemológicos. Así, las concepciones alternativas son generadas cuando el proceso de adquisición de conocimiento requiere la revisión de presuposiciones (ontológicos y epistemológicos) arraigadas que pertenecen a la teoría marco.

Otro aspecto de importancia fundamental en el aprendizaje de conceptos científicos es la categorización ontológica (Chi, et al. 1994, Vosniadou 1994, Scott et al. 2008). Chi, et al. (1994) argumentan que la categoría ontológica que se le asigna a un concepto determina el significado del concepto. De acuerdo con esto, las concepciones alternativas surgen porque los estudiantes asignan a los conceptos científicos una categoría ontológica a la que no pertenecen.

En resumen, los siguientes puntos de vista acerca del aprendizaje de la ciencia son comunes a la mayoría de perspectivas cognitivas (Scott et al. 2008):

- (i) Las creencias individuales acerca del mundo natural son construidas en lugar de recibidas.
- (ii) Hay aspectos comunes en cómo los individuos parecen pensar acerca del mundo natural.
- (iii) Las ideas existentes en una persona acerca de un tema particular influyen notablemente su posterior aprendizaje acerca de ese tema.

Estos puntos de vista tienen implicaciones significativas en la comprensión de cómo se enseñan y aprenden los conceptos científicos. El hecho de que el conocimiento científico no pueda ser *transferido* durante la enseñanza, y que el pensamiento que se tiene influye en los resultados del aprendizaje, ofrece un

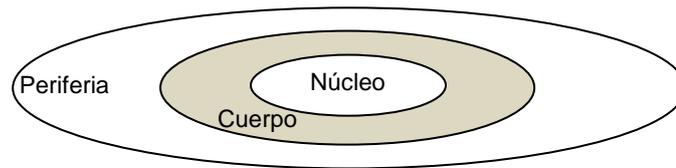
punto de partida para explicar por qué algunos aspectos de la ciencia son difíciles de aprender.

#### **b. Perspectivas socioculturales. Aprendizaje de la ciencia como adquisición**

Estos enfoques constructivistas, basados en la teoría de Vygotsky, consideran el contexto social como una parte integral del proceso de aprendizaje. Se pueden enunciar dos razones para justificar esta naturaleza social: primero, se especifica el origen social del aprendizaje a través de las interacciones del plano social; y segundo se reconoce el contexto social de la comunidad científica para el desarrollo del conocimiento científico (Leach y Scott 2003).

La noción de *lenguaje social* definida como “un discurso peculiar para un estrato específico de la sociedad (profesional, grupo de edad, etc.) dentro de un sistema dado en un tiempo dado” (Bakhtin 1934/1981, citado por Scott et al. 2008, p.42). Permite fundamentar la visión del conocimiento científico como un producto de la comunidad científica, si se considera la ciencia como un lenguaje social desarrollado dentro de la comunidad científica. Este lenguaje se basa en conceptos específicos e involucra el desarrollo de modelos que constituyen una imagen simplificada de los fenómenos naturales. Así, aprender ciencias involucra el aprendizaje del lenguaje social de la “ciencia de la escuela” (Leach y Scott 2002).

Otra perspectiva sociocultural del aprendizaje es propuesta por Tseitlin y Galili (2005), quienes proponen una visión de la física como disciplina-cultura que recuerda a la propuesta de Lakatos (1982) sobre las teorías científicas. En la propuesta de Tseitlin y Galili (2005) una disciplina-cultural tiene una organización triádica (ver figura 2.1), conformada por tres dominios: (i) *núcleo*: principios fundamentales, paradigma y afirmaciones de naturaleza meta-disciplinar; (ii) *cuerpo*: todo conocimiento disciplinar normal, desarrollado con base a los principios contenidos en el núcleo; y (iii) *periferia*: contiene el conocimiento que está en conflicto con los principios del núcleo particular. Este enfoque puede ser aplicado a cada una de las teorías de la física (por ejemplo el electromagnetismo).



**Figura 2.1 Organización triádica de una disciplina-cultura**

La organización tripartita de disciplina-cultura puede ayudar a interpretar el proceso de aprendizaje. La razón fundamental de este enfoque está en el intento de concebir la cognición humana como organizada de una manera similar a la de la cultura, en la cual el estudiante está inmerso (Vygotsky 1985).

El proceso de aprendizaje se puede considerar como el que da lugar a un cambio en el contenido del núcleo, en este caso del conocimiento del individuo. Inicialmente, las nuevas ideas en el curso del aprendizaje se adoptan en la periferia. Gradualmente, surge tensión entre las nuevas ideas (periferia) y las concepciones previas a la enseñanza, localizadas en el núcleo. Finalmente, este conflicto cognitivo alcanza un punto de rompimiento, y el cambio conceptual se inicia. Así, la enseñanza que busca inducir cambio conceptual comienza por presentar nuevos contenidos y fortalecer el conocimiento de la periferia. El incremento de tensión con el núcleo podría ser incrementado a través de enfocarse en los nuevos conceptos, compararlos con aquellos inicialmente mantenidos, y enfatizar su naturaleza incompatible (Tseitlin y Galili 2005).

Los siguientes puntos de vista acerca del aprendizaje en ciencias son comunes a las perspectivas constructivistas sociales (Scott et al. 2008):

- (i) El aprendizaje del conocimiento científico implica un paso desde el plano social al plano personal.
- (ii) El proceso de aprendizaje es consecuencia de la construcción de sentido individual por parte del estudiante.
- (iii) El aprendizaje es mediado por varios recursos semióticos, el más importante de ellos es el lenguaje.

- (iv) El aprendizaje de las ciencias implica el aprendizaje del lenguaje social de la comunidad científica, el cual debe ser presentado al estudiante por un profesor o alguna otra figura experta.

A propósito del concepto de fuerza electromotriz, de acuerdo con estos enfoques constructivistas, cuando es presentado a los estudiantes se genera un proceso de aprendizaje de un nuevo lenguaje social, un nuevo modo de hablar y pensar acerca de los fenómenos que involucran este concepto.

### **c. Aprendizaje de la ciencia como participación**

Son aquellos enfoques que conceptualizan el aprendizaje de las ciencias considerándolo como alguna forma de participación. Esta idea se ha generado en gran parte a través de una perspectiva del aprendizaje conocida como *cognición situada*. Desde esta perspectiva las estrategias para solucionar problemas se suponen ligadas al contexto y por lo tanto son de naturaleza *situada*; lo que implica suponer el aprendizaje como un proceso de enculturación, o participación en prácticas socialmente organizadas. El aprendizaje situado enfatiza el aprendizaje a través del compromiso en actividades auténticas (Scott et al. 2008).

Otra perspectiva del aprendizaje a través de la participación es que el aprendizaje de las ciencias implica aprender a hablar ciencia: “eso significa aprender a comunicarse en el lenguaje de la ciencia y actuar como un miembro de la comunidad de personas que lo hacen” (Lemke 1990, citado por Scott et al. 2008).

Un análisis más detallado revela que la comunicación y el aprendizaje en el aula no sólo se lleva a cabo mediante herramientas lingüísticas. El enfoque que aborda este hecho se conoce como enfoque *multimodal*. El aprendizaje es presentado como un proceso de transformación en el cual los estudiantes son involucrados en el hacer sentido de los eventos multimodales que son desplegados alrededor de ellos en el aula de ciencias.

Los siguientes puntos de vista acerca del aprendizaje en ciencias son comunes a los enfoques participativos (Scott et al. 2008):

- (i) El aprendizaje es visto como un proceso de desarrollo de la participación en las prácticas de una comunidad particular.
- (ii) El estudiante tiene el rol de principiante, mientras que el profesor es visto como un participante experto.
- (iii) Lo que ha de ser aprendido implica algún aspecto de práctica o discurso.

#### **d. Perspectiva integradora del aprendizaje de la ciencia**

Como se mencionó previamente, dada la complejidad de la actividad de enseñanza y aprendizaje de las ciencias en el aula, y que las perspectivas planteadas tienen aspectos relevantes e importantes así como carencias, se requiere de una perspectiva integradora del aprendizaje. Integradora en el sentido de considerar las diferentes aportaciones de forma sistémica y coherente dentro de una teoría general constructivista del aprendizaje.

Inicialmente, se puede considerar la perspectiva constructivista social por ser un marco teórico orientador al juntar el contexto social del aprendizaje con la respuesta individual del estudiante. El profesor es el vínculo clave entre la cultura y los estudiantes (Arcá et al. 1990), al presentar el lenguaje social científico. Los estudiantes deben comprometerse en el acto de construir sentido durante la internalización.

Si hay diferencias significativas entre la ciencia de la escuela y las consideraciones de la cotidianidad respecto a un fenómeno particular, más grandes son las “demandas de aprendizaje” de los estudiantes (Leach y Scott 2002). El concepto de “demanda de aprendizaje” está enmarcado en términos de las diferencias entre lenguajes sociales, y se basa en aspectos de la literatura sobre la cognición individual para identificar los fundamentos epistemológicos y ontológicos de la demanda de aprendizaje. Las diferencias ontológicas existen entre los lenguajes sociales de la cotidianidad y de la ciencia de la escuela.

De acuerdo con los estudios descritos en este apartado, un enfoque integrador del aprendizaje constructivista de las ciencias debería atender a tres tipos de diferencias entre las perspectivas de la cotidianidad y la ciencia de la escuela (Gil-Pérez 1983, Martínez-Torregrosa et al. 1993 , Guisasola et al. 2008c):

- (i) Diferencias en las herramientas conceptuales usadas.
- (ii) Diferencias los fundamentos epistemológicos y ontológicos de estas herramientas conceptuales.
- (iii) Diferencias en los intereses y actitudes para aprender estas herramientas conceptuales.

El punto clave aquí es que el concepto de “demanda de aprendizaje” está enmarcado en términos de las diferencias entre lenguajes sociales, y se basa en aspectos de la literatura sobre la cognición individual para identificar los fundamentos epistemológicos y ontológicos de la demanda de aprendizaje. Las diferencias ontológicas existen entre los lenguajes sociales de la cotidianidad y de la ciencia de la escuela. Cualquier recategorización ontológica requiere que los estudiantes partan del lenguaje social, que se puede abordar a través de la enseñanza sistemática. Es de notar que la enseñanza sistemática aun requiere el esfuerzo cognitivo individual por parte del estudiante para que el aprendizaje se dé. Debe ser prioridad para los estudiantes hacer uso de las nuevas herramientas conceptuales, y hablar y pensar con el lenguaje social científico de manera significativa.

### **2.3 ENFOQUE METODOLÓGICO**

En esta investigación uno de los objetivos es identificar las principales dificultades de estudiantes universitarios en el proceso de aprendizaje del significado del concepto de fuerza electromotriz. Es decir, hallar y sistematizar formas de pensamiento en términos de las cuales los estudiantes interpretan dicho concepto. Para ello la perspectiva metodológica seguida para describir, analizar y comprender el proceso de aprendizaje de los estudiantes, es el de la *fenomenografía* (Marton 1981). Esta metodología es un enfoque relativamente nuevo para la investigación en educación, con las primeras publicaciones que describían el enfoque aparecidas en los años 80. En esta sección comenzamos

por definir la metodología llamada “fenomenografía”; enseguida se describe la forma de analizar los datos obtenidos de acuerdo con esta metodología; luego se define y describe el análisis de la argumentación, que es un aspecto adicional para analizar las entrevistas; y por último, se indican los criterios generales para hacer el análisis de los libros de texto.

### **2.3.1 ¿Qué es la Fenomenografía?**

Una pregunta típica en psicología de la educación es ¿por qué algunos alumnos tienen más éxito que otros en el proceso educativo formal? Cualquier respuesta a esta pregunta es una afirmación acerca de la realidad. Una pregunta alternativa a la anterior es ¿qué piensan las personas acerca de por qué algunos alumnos tienen más éxito que otros en el proceso educativo formal? Cualquier respuesta a esta segunda clase de pregunta es una afirmación acerca de la concepción de las personas de la realidad. Estos dos modos de formular una pregunta representan dos perspectivas diferentes. En el primer caso, y por lo general la perspectiva comúnmente más adoptada, la orientación es hacia el mundo y las afirmaciones que se hacen es acerca de él. En la segunda perspectiva la orientación es hacia las ideas de las personas acerca del mundo (o acerca de su experiencia de él). Para diferenciar estas dos perspectivas se puede llamar a la primera *perspectiva de primer orden* y a la segunda *perspectiva de segundo orden*. Aunque ambas perspectivas son complementarias, en esta investigación nos interesa fundamentar la perspectiva de segundo orden.

La distinción de estas dos perspectivas aquí, no tiene que ver con la diferenciación metafísica entre lo real y lo aparente, o con argumentos a favor o en contra de si hay una realidad como tal que es accesible a nosotros. Tampoco es abordado y mucho menos cuestionado el “carácter real” de una realidad independiente de nuestra percepción de ella, ni el “carácter real” de nuestra experiencia de esta realidad. Más bien, esta distinción de perspectivas tiene un carácter pragmático. Hay dos razones relacionadas para justificar la formulación de preguntas desde la perspectiva de segundo orden. En primer lugar, conocer los diferentes modos en que las personas experimentan,

interpretan, entienden, aprehenden, perciben o conceptualizan diversos aspectos de la realidad es de interés por el potencial pedagógico. En segundo lugar, las descripciones a las que se llegan desde la perspectiva de segundo orden son autónomas en el sentido de que ellas no pueden ser derivadas desde la perspectiva de primer orden. Esto significa que, volviendo al ejemplo de las preguntas del párrafo anterior, si se busca conocer qué piensan las personas acerca de por qué algunos alumnos tienen más éxito que otros, se tiene que investigar este problema ya que la respuesta no se puede derivar del conocimiento (o de los descubrimientos futuros) acerca de las propiedades generales de la mente humana, o de lo que se sabe de la educación formal o de la combinación de ambos saberes.

Un punto esencial de la fenomenografía es que no se puede separar la estructura y el contenido de la experiencia. La distinción entre realidad y percepción de la realidad de ninguna manera es auto-evidente. El objetivo de esta metodología es establecer y sistematizar formas de pensamiento en términos de las cuales las personas interpretan aspectos de la realidad. Este tipo de indagación, complementaria a otras formas de indagar o investigar, pretende describir, analizar y entender experiencias (en nuestro caso generadas en el proceso de aprendizaje de teorías de la Física); es decir, es una investigación dirigida a la descripción de experiencias. Así, la fenomenografía no sólo se parece a la fenomenología a nivel de la palabra. En este contexto, sólo se indicará de manera breve algunas de las diferencias sin abordar las obvias similitudes (Marton 1981).

Primeramente, desde un punto de vista estrictamente fenomenológico, la distinción entre la perspectiva de primer orden y la de segundo orden no es simplemente factible. De acuerdo a esta línea de pensamiento sólo se tiene acceso al mundo a través de la experiencia. Esto implica que no se puede separar lo que es experimentado de la experiencia en sí. Por ejemplo, si se investiga la experiencia de las personas de la ciencia, el fenomenólogo podría ayudar a aprender acerca de la naturaleza de la ciencia, el psicólogo podría ayudar a aprender acerca de cómo las personas experimentan las cosas (por ejemplo dispositivos tecnológicos), y considerando la fenomenografía como un

punto de partida podría ayudar a aprender acerca de la experiencia que tienen las personas de la ciencia.

Una segunda diferencia, es que para la fenomenología la noción de “esencia” es central. Aunque su interpretación varía, en cuanto al estudio de la experiencia de las personas de un cierto aspecto de la realidad, aquí “esencia” se refiere al significado común o intersubjetivo de ese aspecto. La investigación con un enfoque fenomenográfico, muestra que los fenómenos, entendidos como aspectos de la realidad, son experimentados (o conceptualizados) en un número relativamente limitado de modos cualitativamente diferentes. Estos modos de experiencia o formas de pensar, merecen la pena ser estudiados.

En tercer lugar, la fenomenología es básicamente metodológica, mientras que la fenomenografía es “sustancia orientada”. Por ejemplo, “la fenomenología de la ciencia” podría referirse a algo a lo que se llega en relación con la ciencia mediante una investigación fenomenológica. De otro lado, “la fenomenografía de la ciencia” podría referirse a algo que se puede decir acerca de cómo las personas perciben, experimentan y conceptualizan la ciencia.

Y, en cuarto lugar, la investigación fenomenológica está dirigida hacia el nivel pre-reflexivo del conocimiento. El objetivo es describir tanto cómo se veía el mundo sin haber aprendido como verlo o cómo el mundo se da por sentado a partir de la existencia vivida diariamente. En la fenomenografía, se aborda tanto lo conceptual como lo experimentado, y también lo que se piensa de lo que se vive. Además, se puede considerar qué es culturalmente aprendido y cuáles son los modos desarrollados individualmente de relacionarse con el mundo alrededor.

Para analizar cómo se lleva a cabo la investigación sobre el aprendizaje haciendo uso del enfoque fenomenográfico, se considera inicialmente la diferencia de las dos perspectivas presentadas. Los argumentos para aplicar la perspectiva de segundo orden (realidad percibida) al estudio del aprendizaje están estrechamente relacionados a los argumentos empleados para enfatizar el rol central del *contenido* del aprendizaje. Este último se suele pensar como definido por las diferentes disciplinas, tales como la Física o las Matemáticas.

Pensar que el aprendizaje de un contenido específico, por ejemplo la teoría electromagnética, se puede describir mediante una combinación de afirmaciones establecidas desde la perspectiva de primer orden, por un lado acerca del aprendizaje y por otro lado acerca del contenido; implica una idea de aprendizaje basada en la noción de transferencia de conceptos o principios ya hechos al espacio vacío de las cabezas de los estudiantes. En cambio, si se piensa que el contenido del aprendizaje debería ser descrito desde la perspectiva de segundo orden, es una visión basada en el argumento de que la cuestión del contenido del aprendizaje no solamente tiene que ver con el significado *correcto* de conceptos o principios sino también con el significado que los estudiantes le dan a los conceptos o principios en consideración. De acuerdo con la teoría constructivista del aprendizaje (ver sección 2.2.2.) es de gran importancia entender cómo piensan los estudiantes acerca de lo que se les enseña y cómo hacen uso del conocimiento que cada uno tiene. Entonces, si se quiere saber qué se necesita para aprender un contenido específico, por razones puramente lógicas no es suficiente, además del conocimiento del tema, tener conocimiento acerca del aprendizaje y la comprensión en general. También es necesario estudiar de manera específica (con estudiantes) el aprendizaje y la comprensión del tema en consideración (en este caso el concepto de fem).

En cuanto al argumento de que el aprendizaje debe ser descrito en términos de su contenido, es necesario enfatizar que el proceso de aprender y el contenido del aprendizaje son dos aspectos diferentes que constituyen una unidad lógica; no puede haber proceso sin un contenido y no puede haber contenido excepto en términos de una actividad mental. Aunque es necesario ser conscientes que esto no implica ninguna simetría de las representaciones que se elaboren en una dirección o en la otra.

En el aula, probablemente siempre se pueden encontrar diversas maneras en que los estudiantes entienden los conceptos y principios presentados por el profesor o por el autor de un libro de texto. En el momento en que la clase está abordando un nuevo tema, el concepto o principio es entendido por algunos estudiantes de manera similar a la del profesor o a la del autor del texto, y por

otros estudiantes en otros modos que difieren del anterior (del profesor o el autor) y entre ellos. La concepción “autorizada”, la cual se espera que esté en concordancia con el punto de vista de la ciencia moderna, se puede considerar como una de las distintas formas posibles de entender el concepto o principio en cuestión en el aula, y como un caso especial entre las diversas concepciones que la ciencia misma ha mantenido durante su historia. Es decir, es necesario tener presente que una concepción de un cierto aspecto de la realidad, aceptado como la visión correcta científicamente no es algo dado, ni necesariamente válido por siempre. Históricamente, ha habido otras concepciones dominantes que ya no son consideradas como correctas y no es poco razonable pensar que puede haber otras en el futuro (Guisasola et al. 2002).

Las diferencias en la concepción de diversos aspectos de la realidad, no sólo se encuentra entre individuos o entre diferentes periodos en la historia de la ciencia. Si se concibe el aprendizaje en términos de posibles cambios en los modos en que los estudiantes ven un tema, esto claramente se refiere a diferencias dentro de los individuos. Los cambios en los modos individuales de interpretar ciertos aspectos de la realidad con frecuencia son una componente crucial de los descubrimientos científicos. Por ejemplo, Hertz inicialmente produjo ondas electromagnéticas sin saberlo. Él tuvo que “convertirse” (de una mentalidad electrodinámica, según la tradición de Ampère, Weber y Helmholtz; a una mentalidad de campo electromagnético, según la tradición de Faraday y Maxwell) para llegar a ver esas ondas. Es decir, tuvo que abandonar el convencimiento de que la electricidad es cosa de cargas y corrientes que circulan por los conductores, para verla existiendo libremente en el espacio en torno a ellos. En sus palabras: *“El punto de vista desde el que habían sido interpretados los experimentos en los trabajos anteriores, era el punto de vista en el que me había situado, a través del estudio de los artículos de von Helmholtz... Así que había que intentar ver si no nos bastaría con estos supuestos, mucho más simples, de la teoría maxwelliana. El intento salió bien.”* (Hertz 1990, p. 47). La evolución del pensamiento y de la terminología de Hertz, son un prototipo del cambio conceptual necesario en los descubrimientos científicos.

El enfoque sobre concepciones de aspectos específicos de la realidad, es decir sobre aprehender (percibir o conceptualizar) contenidos de pensamiento o experiencia, como un punto de partida para llevar a cabo investigación, y como una base para integrar los hallazgos, es una de las principales características de la fenomenografía. En esta orientación, el mundo de los individuos y no el individuo mismo es “tematizado” y descrito. No sólo se busca señalar concepciones, sino también relaciones entre ciertas concepciones de un aspecto del mundo y ciertas concepciones de otro aspecto. Es decir, no sólo se busca hacer una lista de concepciones. Algunos aspectos ciertamente son más básicos que otros y diferentes capas del mundo percibido (más o menos fundamentales) se pueden sacar a la luz o revelar.

### **2.3.2 Categorías de Descripción desde la Perspectiva Fenomenográfica**

Desde la perspectiva piagetiana la diferenciación entre sujeto y objeto es fundamental para identificar los diferentes modos que tienen las personas de conceptualizar el mundo alrededor de ellos. Gran parte del trabajo empírico de Piaget se llevó a cabo desde la perspectiva de segundo orden. Piaget describió cómo se perciben diversos aspectos del mundo desde el punto de vista de los niños (Piaget 1970). El objetivo principal de estas descripciones era dar luz sobre el desarrollo del conocimiento en términos de sus diferentes formas, reflejando diversos aspectos de la realidad (Piaget y García 1982). Sin embargo, hubo una tendencia gradual en la investigación de Piaget, por un lado, a enfocarse en las similitudes generales entre los diversos aspectos y, por otro lado, a considerar estas semejanzas formales como entidades psicológicamente reales. Desde las dos perspectivas planteadas aquí, eso implica un cambio desde la perspectiva de segundo orden a la de primer orden. Lo que es dominante, según Piaget, no son los diversos conceptos sino una estructura formal que al ser aplicada a diferentes dominios, produce diferentes conceptos. La evidencia empírica no da mucho apoyo a la existencia de estas estructuras (operatorias). No es una estructura formal aplicada a diferentes dominios lo que produce diferentes conceptos, más bien es el contenido y el contexto en el cual es presentado; el aprendizaje del estudiante está fuertemente influenciado por el cómo interpreta el contenido que se le presenta

y si esta interpretación coincide con las premisas de quien hace la presentación (por ejemplo el profesor o el autor de un libro de texto). De esto se puede inferir que no es posible ganar conocimiento acerca del aprendizaje como tal. Es decir, el aprendizaje epistemológicamente no se puede alcanzar de manera independiente del contexto y del contenido (Marton 1981). Si se restringe el significado del uso del constructo de Piaget (el de estructura formal) para caracterizar el desarrollo del “sujeto que conoce” (y no como él argumentaba, al desarrollo del conocimiento) el interés se puede reenfocar sobre la contribución más notable del marco piagetiano, el discernimiento de diversas formas de pensamiento, los diversos modos del “mundo oculto” de entender la realidad.

Desde el punto de vista de la fenomenografía, es posible describir las concepciones acerca de un concepto (modos o formas de pensar) de un modo razonable. Esto significa que las mismas categorías de descripción aparecen en diferentes situaciones. Así, el conjunto de categorías es estable y generalizable entre situaciones, incluso si los individuos (por ejemplo estudiantes) se mueven desde una categoría a otra en diferentes ocasiones. La estabilidad individual a través de los contenidos y situaciones debería ser un blanco de la investigación empírica más que darlo por sentado (debería ser mirado como algo a ser descrito y analizado). Las categorías no buscan clasificar a los individuos, son categorías para describir modos de percibir el mundo alrededor nuestro.

Desde el punto de vista de la lógica de la investigación, al investigar concepciones de un cierto aspecto de la realidad en un cierto grupo de personas, si se tiene éxito se llega a la descripción de un cierto número de diferentes concepciones y también se identifica la distribución, en las categorías, del grupo que se está estudiando. En consecuencia, se llega a dos tipos diferentes de resultados: las categorías de descripción en sí mismas, y la distribución de los individuos (por ejemplo estudiantes) en ellas. El primer resultado es cualitativo (¿cuáles son las concepciones mantenidas?), y el segundo es cuantitativo (¿cuántas personas mantienen estas diferentes concepciones?).

De acuerdo con los cánones de la metodología de la investigación se supone que uno debe definir unas variables antes de embarcarse en la parte empírica de una investigación. Pero si las variables son definidas por adelantado, se está limitado a concluir que los resultados son necesariamente cuantitativos. Se podría llevar a cabo un análisis cualitativo con categorías preconcebidas, pero como ellas se refieren a la medida en que las categorías pueden ser aplicadas, los resultados podrían volver a ser cuantitativos. Es necesario notar que, en el enfoque fenomenográfico, las categorías de descripción pueden ser consideradas como resultados.

Los resultados de una investigación realizada se pueden separar en dos aspectos: de un lado, se pueden ver los resultados como categorías de descripción consideradas como instrumentos abstractos para ser usados en el análisis de casos concretos en el futuro. De otro lado, los resultados se pueden enfocar en la aplicabilidad de las categorías en casos concretos. Este carácter dual de la descripción tiene su contraparte en un carácter dual de lo que es descrito. Una concepción existe en el mundo real sólo en términos de un acto mental y eso es exhibido por alguien quien hace algo en un cierto escenario. Entonces, hablando de las categorías de descripción, en el enfoque fenomenográfico, se asume una perspectiva de actividad dinámica y se consideran las categorías casi como si ellas fueran formas “congeladas” de pensamiento. En palabras de Marton (1981, p. 196) “La relación entre concepción como un acto de concebir y concepción como una categoría de descripción se asemeja a la relación entre la sonrisa del gato de Lewis Carroll y la sonrisa que queda cuando el gato es separado de la sonrisa”.

La “concepción” es la unidad de descripción en la investigación fenomenográfica. Así, cabe preguntarse a propósito de la naturaleza de la concepción: ¿qué es una concepción?, ¿cómo se debe denotar una concepción? y ¿cuál es la relación entre concepciones y categorías de descripción? Marton y Pong (2005) argumentan que una concepción se puede caracterizar como compuesta de un aspecto referencial, que denota el significado particular del objeto conceptualizado; y un aspecto estructural, que muestra la combinación específica de características discernida y centrada en

el sujeto. Estos dos aspectos aunque diferentes, son de naturaleza entrelazada. Identificar el significado de un concepto (aspecto referencial) consiste en interpretar lo que la persona está diciendo, mientras que el aspecto estructural puede ser identificado por marcadores lingüísticos (por ejemplo, distinción singular-plural).

Una concepción, la unidad de descripción en fenomenografía, ha sido nombrada de diversas maneras, tales como “modos de conceptualiza”, “modos de experimentar”, “modos de ver”, “modos de aprehender”, “modos de entender”, etc. Es claro, por ejemplo, que conceptualizar no es idéntico a experimentar. La razón para usar tantos sinónimos diferentes es que aunque ninguno de ellos corresponde completamente a lo que se tiene en mente, en cierta medida todos aportan. Se puede discernir y enfocarse en características conceptuales, y se puede discernir y enfocarse en características relacionadas con los sentidos. Significado siempre presupone discernimiento y este a su vez siempre presupone variación. No se puede distinguir una característica que siempre está presente. El contraste juega un rol fundamental en la percepción. Por lo tanto, no hay discernimiento sin variación. La experiencia de variación siempre está presente cuando se expresa una concepción.

Las categorías de descripción denotan formas de pensamiento, que se ponen juntas para caracterizar el mundo percibido (o por lo menos fragmentos de este), se llega a ellas separando formas de pensamiento tanto desde el pensamiento como desde el pensador. Lo que se busca al establecer categorías de descripción, es tematizar la complejidad de modos posibles de ver (o entender) diversos aspectos del mundo. No sólo el acumulado de diferentes concepciones básicas subyacentes, sino también formas alternativas y contradictorias de conocimiento proposicional, independientemente de si estas formas son consideradas correctas o equivocadas. Este sistema supraindividual de formas de pensamiento, es descriptivo del pensamiento humano de dos maneras: Primero, puede ser usado como un *instrumento de descripción* del modo de pensar de las personas en situaciones concretas. Segundo, puede ser visto como *descripción* de pensamiento (Marton y Pong 2005).

El supuesto de relaciones estructurales entre las diferentes categorías (diferentes modos de entender) es uno de los supuestos epistemológicos que subyacen a la metodología fenomenográfica. Así, una premisa fundamental de la fenomenografía es el supuesto de que diferentes categorías de descripción están lógicamente relacionadas. Las categorías de descripción junto con las relaciones estructurales que las vinculan representan la estructura del “espacio de resultados” (Akerlind 2005). Entonces el objetivo del investigador no sólo es establecer un conjunto de diferentes significados (categorías), sino también proponer una estructura lógicamente incluyente relacionando los diferentes significados.

El espacio de resultados proporciona una mirada holística del modo de entender un fenómeno o una teoría, de un colectivo humano. Idealmente, los resultados representan la amplia gama de modos de entender un tema en cuestión, en un momento particular, por el grupo muestra. Marton y Booth (1997) presentan tres criterios primarios para juzgar la calidad de un espacio de resultados fenomenográfico:

- (i) Que cada categoría en el espacio de resultados revele algo distintivo acerca de un modo de entender el tema en cuestión.
- (ii) Que las categorías estén lógicamente relacionadas, típicamente como una jerarquía de relaciones estructuralmente inclusivas.
- (iii) Que los resultados sean parsimoniosos, es decir, que la variación crítica de la experiencia observada en los datos sea representada por un conjunto de categorías tan pequeño como sea posible.

El investigador necesita estar dispuesto constantemente a ajustar su pensamiento a la luz de la reflexión, discusión y nuevas perspectivas. Manteniendo el enfoque en la información que está analizando y en las categorías de descripción que emergen como un conjunto, más que en información y categorías individuales, esto es esencial para mantener la atención en la comprensión colectiva. El proceso total es marcadamente iterativo (lo que implica mirar los datos desde diferentes perspectivas en diferentes momentos) y comparativo, lo que implica la continua clasificación y reclasificación de datos, además de las comparaciones entre los datos y las

categorías de descripción en desarrollo, también se deben hacer comparaciones entre las categorías mismas (Akerlind 2005).

En resumen, el objetivo de la investigación fenomenográfica es analizar los diferentes modos cualitativos que tienen las personas de entender un fenómeno particular o un aspecto del mundo que los rodea (por ejemplo un concepto o una ley general de una teoría científica). Estos “diferentes modos de entender”, o concepciones, típicamente se representan en la forma de categorías de descripción, las cuales se siguen analizando con respecto a sus relaciones lógicas para formar un espacio de resultados.

### **2.3.3 Entrevistas: Análisis de la Argumentación**

En la última década, ha habido un número creciente de estudios acerca del análisis de la argumentación en el contexto del aprendizaje de las ciencias (Entre otros: Driver et al. 2000, Kelly y Takao 2002, Jiménez-Aleixandre y Díaz 2003, Jiménez-Aleixandre y Erduran 2008). Estos trabajos se presentan desde dos marcos relacionados: Un marco tiene que ver con estudios de las ciencias que resaltan la importancia del discurso en la construcción del conocimiento científico y las consecuencias para la educación. Un segundo marco, es la perspectiva sociocultural (Vygotsky, 1985) que señala el rol de la interacción social en los procesos de pensamiento y aprendizaje, y da a entender que los procesos de pensamiento más alto se originan en actividades mediadas socialmente, particularmente a través de la mediación del lenguaje. A estos se puede añadir un interés en la participación democrática, que requiere debate entre diferentes visiones más que la aceptación de la autoridad.

De los dos marcos anteriores se puede derivar una visión acerca del aprendizaje de las ciencias en términos de la apropiación de prácticas comunitarias que promueven los modos de comunicación requerida para sostener un discurso científico. Esta concepción del aprendizaje de la ciencia involucra la construcción y uso de herramientas que, como la argumentación, son un medio para la generación de conocimiento acerca del mundo natural (Jiménez-Aleixandre y Erduran 2008). La argumentación juega un rol central en la construcción de explicaciones, modelos y teorías, ya que los científicos usan

argumentos para relacionar la evidencia a través de afirmaciones que ellos han alcanzado a través del uso de justificaciones y respaldos (Toulmin 2007). En este sentido, la argumentación es muy importante en la elaboración del discurso en ciencia.

Llegados a este punto es importante clarificar las respuestas a preguntas tales como: ¿Qué significa argumento? ¿Un argumento es una declaración o un proceso? ¿Un argumento necesita ser producido por un individuo o puede ser co-construido entre individuos? ¿Un argumento siempre está relacionado con un contexto dialógico o puede tomar lugar internamente en las mentes individuales? Jiménez-Aleixandre y Erduran (2008) hacen una revisión del significado de argumentación y presentan varias respuestas, de las cuales sólo se mencionan las más relevantes para nuestra investigación. Una primera respuesta, considera que la palabra *argumento* tiene tanto un significado individual como social. El significado individual se refiere a cualquier parte de un discurso razonado. El cómo un individuo articula un punto de vista, muestra la elaboración de un argumento. El significado social es el de un debate o discusión entre personas con posiciones diferentes respecto a un tema. En otras palabras, un argumento puede ser o una cadena de razonamientos internos (estrategias de pensamiento interno) o una diferencia de posiciones entre individuos. Hay un vínculo entre las dos. La argumentación social es un poderoso vehículo para desarrollar pensamiento de orden más alto que la argumentación interna.

Otra respuesta, restringe el significado de un argumento a lo social: “La argumentación es una actividad verbal, social y racional dirigida a convencer a un crítico razonable de la aceptabilidad de un punto de vista con la presentación de una constelación de proposiciones que justifican o refutan la tesis expresada en el punto de vista” (van Eemeren y Grootendorst 2004, citado por Jiménez-Aleixandre y Erduran 2008, p. 12). Esta definición enfatiza los aspectos sociales, en contraste a otros que enfatizan la perspectiva individual. De acuerdo con Jiménez-Aleixandre y Erduran (2008), estas posiciones pueden ser parcialmente reconciliadas si se usa el término *argumento* para el producto, declaración o parte de un discurso razonado; y

*argumentación* o discurso argumentativo para el proceso social o actividad. Acerca de la pregunta de la producción individual o co-construida del argumento, en concordancia con el significado tanto individual como social, se considera que ambos casos son posibles.

De los diferentes significados de argumentación por lo menos dos son relevantes para el contexto del aula de ciencia: argumentación como justificación de conocimiento y argumentación como persuasión. En ciencia, la construcción de conocimiento está vinculada a la justificación de conocimiento, y las afirmaciones deben ser relacionadas ya sea a construcciones lógicas o a datos y evidencia de diferentes fuentes (o a ambas). Entonces, la argumentación en los tópicos científicos se puede definir como la conexión entre afirmaciones y datos a través de la justificación o la evaluación de afirmaciones de conocimiento a la luz de evidencia, ya sea empírica o teórica. Esto diferencia las afirmaciones científicas de las opiniones (Jiménez-Aleixandre y Díaz-Bustamante 2003).

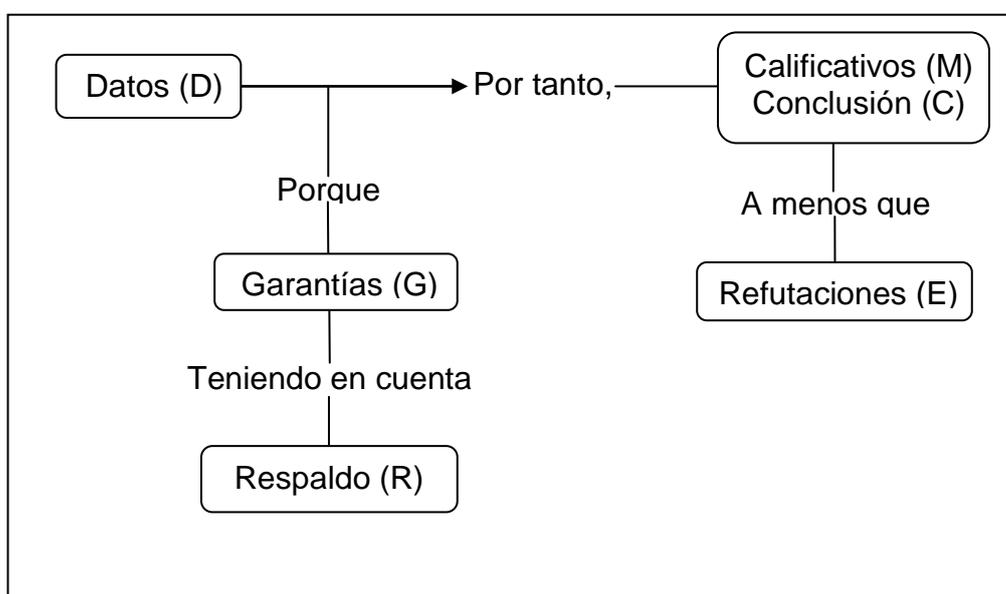
Argumentación como persuasión se puede definir como el proceso de convencer una audiencia. El reconocimiento del rol de la práctica discursiva en la construcción de conocimiento científico sugiere que el discurso tiene que ser considerado relevante para la apropiación de la cultura científica por los estudiantes.

El significado de la argumentación, desde el punto de vista histórico, tuvo un momento crucial con la publicación en 1958 del libro "*los usos de la argumentación*" de S. Toulmin. Desde ese momento se ha incrementado la atención en la racionalidad del discurso. La propuesta de Toulmin (2007) es relevante para aquellos interesados en el razonamiento y la argumentación como punto de partida de una dimensión práctica, como por ejemplo los estudiosos de las ciencias físicas. Una consecuencia del libro de Toulmin es el concepto de "modelo o esquema de Toulmin"; este puede ser visto como un movimiento hacia el estudio de la argumentación como es practicada en los lenguajes naturales, y por lo tanto lejos de los esquemas de la lógica formal. En este sentido Toulmin afirma: "... las categorías de la lógica formal se construyeron a partir de un estudio del silogismo analítico, que éste es un tipo

de argumento no representativo y engañosamente fácil y que muchos de los lugares comunes paradójicos de la lógica formal y de la epistemología provienen de una aplicación errónea de dichas categorías a argumentos de otras clases.” (Toulmin 2007, p.193). La implicación de esto es que la lógica formal se puede usar para representar o analizar el *conocimiento establecido*, pero no es un marco adecuado para interpretar discursos en situaciones donde se está generando *nuevo conocimiento*. En situaciones de discurso natural, por ejemplo cuando se está solucionando un problema en el aula de ciencias o en el laboratorio, muchas proposiciones pueden no ser correctas o ser incluso falacias desde la perspectiva de la lógica formal, y aun así constituir pasos fructíferos en la construcción de conocimiento. Toulmin buscó describir la argumentación en la práctica y por lo tanto desafió la noción de validez deductiva. Hizo una distinción entre las nociones idealizadas de argumentos que se emplean en matemáticas y la práctica de argumentos en contextos lingüísticos, los cuales, según él, deben tener estrechos lazos con la epistemología. Toulmin buscó una interpretación de argumentación opuesta a la idea rígida de que todos los argumentos tienen la forma “de premisas a conclusiones”. Su interés fueron los argumentos justificatorios (que pueden ser de muchas clases diferentes) utilizados para apoyar afirmaciones enunciadas. Es decir, sitúa la validez de un argumento en la coherencia de su justificación.

El esquema o modelo de argumento de Toulmin (MAT), distingue varios elementos en un argumento: la *afirmación* o conclusión (C); los *datos* (D) son las justificaciones que constituyen la base de la afirmación realizada; las *garantías* (G) son las proposiciones que responden a la pregunta cómo a partir de los datos se pasa a la afirmación original o conclusión; los *calificativos* o *matizadores* (M) indican la fuerza conferida por la garantía en el paso adoptado; las *condiciones de refutación* (E) enuncian las circunstancias en que la autoridad general de la garantía ha de dejarse a un lado, es decir pueden hacer descartar o rechazar la conclusión o afirmación justificada; y el *respaldo* (R) que son certezas que permiten que las garantías tengan autoridad y vigencia, es decir consolidan las garantías. El tipo de respaldo de las garantías varía de un contexto de argumentación a otro (ver figura 2.2). Más específicamente, una afirmación es una aseveración presentada públicamente

para la aceptación general. Los datos y las garantías son los hechos específicos invocados para apoyar una afirmación dada. Los respaldos son generalizaciones que hacen explícito el cuerpo de experiencia invocada para establecer la confiabilidad de los modos de argumentar aplicados en algún caso particular. Las refutaciones son las circunstancias extraordinarias o excepcionales que pueden socavar la fuerza de los argumentos que apoyan. Toulmin además consideró el rol de calificativos como frases que muestran qué tipo de grado de confiabilidad se va a colocar en las conclusiones, dadas las evidencias disponibles para apoyarlas (Toulmin 2007).

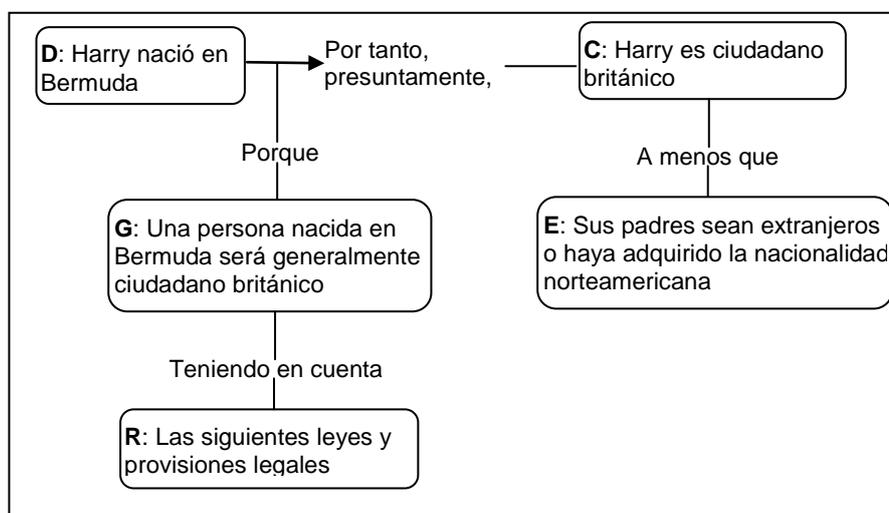


**Fig. 2.2 Forma general del Modelo de Argumento de Toulmin**

El análisis de argumentos no es una tarea sencilla tanto para investigadores como para profesores. Así, ha emergido una variedad de herramientas y técnicas que buscan ayudar en la tarea de análisis (Erduran 2008). Una de las herramientas más común e intuitiva es la diagramación, mediante la cual la forma abstracta de un argumento se puede identificar y apreciar de un vistazo, y así es entonces posible analizar más cercanamente las relaciones entre partes del argumento (ver figuras 2.2 y 2.3). La utilidad de diagramar argumentos es vista en su adopción casi universal en la enseñanza de pensamiento crítico y habilidades de argumentación. Toulmin enmarcó los argumentos en un complejo de seis partes, que comprende Datos, Garantías, Conclusión, Respaldo, Refutaciones y Calificativos. Una observación importante es que cualquiera que sea el marco teórico, ya sea el diagrama de

Toulmin o de otro autor, es mucho más que simplemente hacer esquemas. La diagramación incorpora muchos supuestos y conclusiones teóricas, y funciona como un modo de resumir y aplicar teorías importantes como herramientas prácticas que son simples y fáciles de entender.

Toulmin (2007), ilustra su modelo de argumento con la afirmación (C) “Harry es un ciudadano Británico”. Esta conclusión se apoya en el dato (D) “Harry nació en Bermuda”. La conexión entre el dato y la afirmación es expresada por la Garantía (G) de que “un hombre nacido en Bermuda generalmente es un ciudadano británico”. A su vez la garantía se puede apoyar por el respaldo que ciertas leyes y provisiones legales ofrecen. Sin embargo, las cuestiones de nacionalidad siempre están sujetas a matizaciones y condiciones, lo que hace necesario insertar un modalizador (M): “presumiblemente” al lado de la conclusión. Además, hay posibles refutaciones (E), por ejemplo si ambos padres son extranjeros o si Harry ha adquirido la nacionalidad norteamericana. El esquema de la figura 2.3 ilustra el MAT aplicado a este ejemplo.



**Fig. 2.3 Aplicación del Modelo de Argumento de Toulmin**

Toulmin escasamente profundizó en la naturaleza de las refutaciones (Erduran 2008). Para él las refutaciones involucran condiciones de excepción del argumento (Toulmin 2007). Al parecer, para él, las refutaciones pueden tener varias funciones. Por ejemplo, las refutaciones pueden “indicar circunstancias en las cuales la autoridad general de la justificación tendría que ser dejada de lado”; pero también pueden ser “circunstancias excepcionales que pueden ser

capaces de refutar la conclusión justificada”; y también habla de la aplicabilidad de una garantía en conexión con las refutaciones. Verheij (2005) distingue estas tres funciones de un modo que se ajuste a la reconstrucción de los otros elementos del esquema de Toulmin. Afirma que hay cinco enunciados contra los que se puede argumentar:

- (i) Los datos D
- (ii) La conclusión C
- (iii) La garantía G
- (iv) El condicional asociado “sí D, entonces C” que expresa el puente entre los datos y la conclusión.
- (v) El condicional asociado “sí G, entonces sí D, entonces C” que expresa el puente entre justificación y el condicional asociado anterior.

Las razones contra cualquiera de estos enunciados pueden ser vistas como un *tipo de refutación* de un argumento conformado por garantías, datos y conclusión. Los primeros tres enunciados son claramente diferentes. Un argumento contra el dato Harry nació en Bermuda difiere de un argumento contra la conclusión Harry es ciudadano británico, y de un argumento contra la garantía: una persona nacida en Bermuda será generalmente ciudadano británico. Un argumento en contra del cuarto tipo de enunciado (el primer condicional asociado) se puede considerar como un ataque a la conexión entre datos y conclusión. Un argumento contra el quinto tipo de enunciado puede ser mirado como un ataque contra la aplicabilidad de la garantía: normalmente la garantía puede justificar el condicional que conecta datos y afirmación, pero ya que hay una refutación, la garantía no aplica.

Las tres situaciones a las cuales Toulmin atribuye el término refutación son, entre estos cinco enunciados, la segunda, la quinta y la tercera respectivamente. Los otros dos tipos de refutaciones de un argumento conformado por garantía-datos-conclusión al parecer no son mencionados por Toulmin (Verheij 2005).

Las refutaciones se pueden usar como un indicador de calidad del razonamiento (Erduran 2008). Una discusión con refutaciones es de mejor

calidad que aquellas en que no se ofrecen. Los estudiantes involucrados en una conversación o discusión sin refutaciones permanecen epistemológicamente incuestionables. Las razones de sus creencias no son cuestionadas y sólo hay oposición por una reconvención que puede ser más o menos persuasiva pero no es un desafío sustantivo a la afirmación original. Así, los argumentos con refutaciones son de mejor calidad y demuestran un nivel más alto de argumentación.

Examinando la forma de los argumentos en diferentes contextos o campos (como ciencias, política o leyes), Toulmin distinguió entre formas de argumentación dependientes del campo y formas independientes del campo. Esta última se enfoca en los patrones generales de los argumentos, que implica los datos, afirmaciones, garantías, respaldos, refutaciones y calificativos; mientras que las formas dependientes del campo se refieren a qué cuenta como datos, garantías o respaldos (Duschl 2008). Así, las apelaciones usadas para justificar afirmaciones elaboradas en la construcción de explicaciones históricas no necesariamente son del mismo tipo de las apelaciones usadas para apoyar afirmaciones de explicaciones causales o probabilísticas. La flexibilidad del modelo de Toulmin para funcionar en diferentes contextos proporciona una ventaja para entender y evaluar los argumentos planteados por los estudiantes en ciencias (Jiménez-Aleixandre y Erduran 2008). Esto explica que un conjunto significativo de la literatura acerca de la argumentación en la educación en ciencias se ha basado en el trabajo de Toulmin, particularmente considerado como un enfoque metodológico.

Organizar el discurso del estudiante en las componentes del modelo de argumento de Toulmin proporciona un medio para aislar líneas de argumentos, y requiere una atención cuidadosa del uso del lenguaje contextualizado. En este sentido, Toulmin propone que la calidad de un argumento no puede ser juzgada sólo por la forma (por ejemplo *modus ponens*, *modus tollens*). Más bien, el contenido y el contexto de un argumento (es decir, la evaluación de argumentos como se producen en la práctica) son críticamente importantes para determinar lo que cuenta como datos, garantías y respaldos. Por esta razón Toulmin introduce la idea de campo de argumentación. El campo marca

el contenido del argumento. El análisis de la argumentación es un instrumento útil tanto para comprender mejor el razonamiento de los estudiantes como para explorar el desarrollo de la comprensión conceptual en un campo particular (Kelly y Takao 2002, López-Rodríguez y Jiménez-Aleixadre 2007).

Sandoval y Reiser (2004) proponen que para juzgar la calidad de argumentos científicos generados por estudiantes, se puede enfatizar la valoración de dos dimensiones de los argumentos científicos al hacer uso del MAT. Primero, medir la capacidad conceptual; es decir, lo bien que los estudiantes han (a) articulado afirmaciones causales dentro de un marco teórico específico, y lo bien que han (b) justificado (G) estas afirmaciones usando los datos disponibles. Segundo, medir la calidad epistemológica; es decir, medir lo bien que los estudiantes han (a) citado suficientes datos en justificar una afirmación, lo bien que han (b) enunciado una explicación causal coherente para un fenómeno dado, y lo bien que han (c) incorporado referencias teóricas apropiadas cuando se hace referencia a los datos. Una fortaleza de este marco es que se puede determinar si los estudiantes pueden generar un argumento que explique un fenómeno particular observado usando una teoría específica, tal como la teoría electromagnética. Además, este marco proporciona información acerca de los criterios epistemológicos usados por los estudiantes cuando generan argumentos como un producto de su propia indagación o reflexión y cómo estos criterios se alinean con los criterios usados dentro de dominios científicos particulares (Sandoval y Millwood 2008). Esta perspectiva sugiere que la construcción de argumentos de alta calidad requiere una comprensión conceptual de las teorías científicas y su aplicación a problemas científicos así como una comprensión epistémica de los criterios para argumentos de alta calidad (Erduran 2008). La importancia de esto último radica en que la manera cómo los estudiantes incorporan y se refieren a datos en sus análisis refleja sus compromisos epistemológicos implícitos acerca de la naturaleza y el rol de los datos en la generación y evaluación de conocimiento científico (Sandoval 2005).

Erduran (2008) comenta que un patrón global de las justificaciones y la evidencia citada sugieren que aunque los estudiantes entienden la importancia

de vincular la evidencia y las afirmaciones, ellos tienden a confiar en una única parte de los datos cuando apoyan una afirmación particular. Como consecuencia, los estudiantes con frecuencia no incluyen una comparación de datos desde múltiples fuentes cuando justifican una afirmación en casos donde tales comparaciones son necesarias.

#### **2.3.4 Análisis de los Libros de Texto**

Los libros de texto son un aspecto de importancia central en la enseñanza de las ciencias y frecuentemente influyen en cómo y qué aprenden los estudiantes y en cómo y qué enseñan los profesores (Harrison 2001, Alexander y Kulikowich 1994). Los libros de texto son frecuentemente utilizados en los cursos de ciencias como primeros organizadores de los temas que se espera que los estudiantes aprendan y suministran detalladas explicaciones sobre los temas que deben ser enseñados (Stern y Roseman 2004). Aunque los libros de texto no son el único factor que influye en el conocimiento en física de los estudiantes es un factor decisivo, tanto porque representan la ciencia escolar tal y como la experimentan los estudiantes, como por su efecto sobre el comportamiento del profesorado.

La investigación en dificultades conceptuales suele frecuentemente partir de la premisa de que las ideas científicas son ampliamente comprendidas, no discutidas entre 'los expertos', y que los tratamientos de los libros de texto y de los 'sitios web' son básicamente correctos. Las concepciones alternativas se suelen considerar como generadas por los estudiantes y que pueden ser abordadas desde el planteamiento constructivista del aprendizaje. Las dificultades de los estudiantes se suelen atribuir a pedagogías desfasadas y se aconsejan estrategias de enseñanza alternativas para abordar las ideas complejas. Sin embargo, las relaciones entre los libros de texto disponibles y el aprendizaje que parece tener lugar no suele ser tenido en cuenta (Niaz y Fernández 2008). Los estándares educativos de las últimas décadas reconocen la importancia de la evaluación de los libros de texto (AAAS 1990, NRC 2000, European Commission 2007). Estos documentos hacen una llamada a presentar los conceptos y teorías científicas en un contexto apropiado donde

se comprenda los problemas científicos y sociales que suscitaron su origen y las soluciones que aportan.

El aspecto más importante de cualquier análisis de la información es el marco conceptual utilizado para guiar la investigación. Existe una variedad de marcos conceptuales para conducir el análisis de libros de texto, cada uno designado para evaluar material escrito desde una perspectiva concreta. Algunas perspectivas se centran en los problemas del contenido, otras sobre la dificultad del contenido y su fiabilidad, y otras en la orientación epistemológica del contenido (Koulaidis y Tsatsaroni 1996). En nuestro caso nos hemos centrado en dos aspectos de la Investigación en enseñanza de la física: (i) las dificultades conceptuales de los estudiantes y el aprendizaje comprensivo de los conocimientos científicos (la ciencia como cuerpo teórico de conocimientos); (ii) la perspectiva de considerar la ciencia como una forma de investigar y pensar (Epistemología de la Ciencia). Este estudio se basa en la premisa de que la mejora del marco conceptual presentado en los libros de física puede facilitar la comprensión conceptual de los estudiantes. Como indica Bybee (1989) para reformar la educación es necesario evaluar el papel de los libros de texto y cómo influyen en el aprendizaje de las ciencias.

El primer aspecto del análisis se refiere a la ciencia como cuerpo de conocimientos que debe ser aprendido con comprensión y que puede presentar dificultades de aprendizaje. La expresión “aprendizaje con comprensión” es utilizada aquí para indicar que el marco teórico del que aprende es fundamental para la comprensión de toda la situación o escenario (características psicocognitivas del aprendiz) (Leach y Scott 2003). Como ya indicaba Resnick (1983) en la primera propuesta de cambio conceptual *“todo el aprendizaje depende del conocimiento previo”* o *“los alumnos construyen su comprensión. Ellos no se limitan a reflejar lo que les dicen o lo que leen”*. En el marco de la teoría constructivista del aprendizaje la comprensión se desarrolla en contextos cercanos a las experiencias de los estudiantes (Savery y Duffy, 1995), por ello se tiene en cuenta el razonamiento de los estudiantes en contexto (Duschl y Gitomer 1991).

Un aspecto clave del aprendizaje con comprensión es que el nuevo material para ser aprendido debe responder a ideas relevantes para la estructura cognitiva ya existente del aprendiz de forma fundamentada, no basada en la repetición de un lenguaje específico; la enseñanza eficaz capacita al aprendiz para explorar su conocimiento actual. La expresión “aprender de memoria” (“rote learning”) se utiliza para el aprendizaje que es verbalizado, no entendido o sin relaciones con el conocimiento previo. Los términos “memorístico” y “comprensión” son concebidos como los extremos de fines diferentes de un espectro, más que como alternativas directas. La explicación de un libro de texto debe ser por tanto, más parecida al aprendizaje con comprensión; su utilización debe construir ideas de la realidad, poner en contacto al lector con experiencias relevantes del mundo natural y con el conocimiento previo.

El Segundo aspecto del análisis tiene en cuenta que las reformas educativas que se iniciaron a finales de los años ochenta propusieron dar más énfasis en la enseñanza de las ciencias al cómo se trabaja en ciencias. Los estándares educativos de diferentes países resaltan la importancia de presentar la ciencia como proceso creativo que elabora teorías y conceptos como soluciones tentativas a problemas presentados por los científicos y la sociedad. Estas teorías y modelos tienen características específicas tales como verificación empírica, capacidad de predicción y ser universales (NRC 1996, European Commission 2007). Como indican Etkina et al. (2006) *“De acuerdo a muchos estudios nuestros estudiantes después de salir del mundo académico se les pedirá solucionar problemas complejos, diseñar experimentos, y trabajar con otras personas. Varios documentos que guían el diseño y evaluación del programa K–16 incorporan el desarrollo de estas habilidades como objetivos primarios”*. La atención en el currículo sobre las habilidades científicas se ha beneficiado de muchas investigaciones sobre la importancia de la Naturaleza de la Ciencia (NdC) en la enseñanza de las ciencias, que han reclamado una enseñanza que refleje una imagen adecuada y más auténtica de la ciencia (Abd-El-Khalic y Lederman 2000, Abd-El-Khalic 2001, Bartolomew, Osborne y Ratcliffe 2004, Duschl 1990, Hodson 1992, McComas 1998, Mellado 1998, Matthews 1994). Nosotros utilizamos el término “Naturaleza de la Ciencia” para describir aspectos de diferentes áreas como la historia, la sociología y la

epistemología de la ciencia con el objetivo de explorar qué es la ciencia, cómo trabajan los científicos como grupo social y cómo la propia sociedad se enfrenta y reacciona a los problemas derivados de la ciencia. Hace más de una década Driver et al. (1996) argumentaban que es necesario tener en cuenta los objetivos de la NdC si los profesores queremos transmitir a los estudiantes una imagen adecuada de la ciencia. Dado que los libros de texto son un componente importante de la ciencia escolar, tienen que incorporar en la presentación de conceptos, leyes y teorías, estas recomendaciones.

## **2.4 DISEÑOS EXPERIMENTALES**

Para abordar la pregunta número dos de esta investigación: ¿Cuáles son las principales dificultades de estudiantes universitarios en el proceso de aprendizaje del significado del concepto de fuerza electromotriz? Y, a su vez, contrastar la primera hipótesis (ver apartado 2.1); se diseñaron tres cuestionarios y dos entrevistas.

Y, para abordar la pregunta número tres de esta investigación: ¿Cómo se presenta el concepto de fuerza electromotriz en los libros de texto de cursos introductorios de física en la universidad? Y, a su vez, contrastar la segunda hipótesis (ver apartado 2.1); se diseñó un protocolo de análisis de libros de texto.

A continuación se presentan estos diferentes diseños experimentales.

### **2.4.1 Cuestionarios y Criterios de Análisis**

Se diseñaron tres cuestionarios para valorar el grado de comprensión de los estudiantes acerca del concepto de fem en diferentes situaciones. En particular, hemos formulado diferentes preguntas que abordan diferentes aspectos de este concepto. Algunas respuestas requieren un análisis cualitativo, otras requieren un análisis cuantitativo, otras elaborar una imagen de la situación, y otras requieren la construcción de un modelo físico (pensar en términos de un sistema físico). Se asumió que los estudiantes acceden al

conocimiento pertinente y lo usan para construir un modelo mental que les permita responder las preguntas.

A propósito de los diferentes tipos de preguntas que se pueden formular al diseñar un cuestionario, diferentes investigaciones han mostrado que cierto tipo de preguntas tienen un potencial mayor que otras, para proporcionar información acerca de las estructuras conceptuales que subyacen en los estudiantes. Por ejemplo, las preguntas factuales (Vosniadou 1994), requieren que los estudiantes repitan información que usualmente ha sido expuesta a través de la enseñanza. Las respuestas científicamente correctas a estas preguntas no necesariamente significan que los estudiantes han entendido el concepto en cuestión, ya que ellos con frecuencia repiten la información que han recibido a través de la enseñanza sin comprender plenamente el concepto (o la temática).

Las preguntas generativas (Vosniadou 1994), confrontan a los estudiantes con fenómenos acerca de los cuales ellos no han tenido una experiencia directa o no han abordado explícitamente en la enseñanza. Como las preguntas generativas no se pueden responder sobre la base de información almacenada o a través de la simple repetición de información no asimilada, tienen un gran potencial para desentrañar estructuras conceptuales subyacentes. Se asume que para responder una pregunta generativa, los estudiantes deben crear una representación mental o un modelo mental, y explorarlo para derivar de él una respuesta relevante.

Por lo tanto, las respuestas a preguntas generativas tienen un mayor potencial que las respuestas a las preguntas factuales para desentrañar los modelos mentales que los estudiantes usan durante la solución creativa de problemas, y proporcionan información acerca de las estructuras teóricas que los constriñen. En este orden de ideas, hemos privilegiado el planteamiento de preguntas generativas en el diseño de los cuestionarios.

### a. Primer cuestionario

Se diseñó con cuatro preguntas (ver cuadro 2.1). Las preguntas 1.1 y 1.2 abordan ejemplos del uso del concepto de fem en un contexto diferente al de circuito eléctrico (efecto piezoeléctrico y generador Van der Graaf). A los estudiantes se les preguntó si el concepto de fem es útil en estos contextos y se les pidió explicar su uso (o no uso). El objetivo de estas dos preguntas era investigar la comprensión de los estudiantes de los conceptos de diferencia de potencial y de fem en un contexto que no se suele hacer explícito en la enseñanza habitual de circuitos eléctricos.

Para contestar correctamente la pregunta 1.1, los estudiantes deben saber que el trabajo mecánico hecho sobre los lados del vidrio produce separación de carga eléctrica y una diferencia de potencial; además, este trabajo por unidad de carga es medido por la magnitud fem.

En la respuesta a la pregunta 1.2 es necesario que los estudiantes empleen la definición de fem. El trabajo mecánico por unidad de carga realizado por el generador Van der Graaf para separar cargas eléctricas y producir una diferencia de potencial es medido por la fem. Esto implica que es útil y correcto aplicar este concepto para medir la transferencia de energía producida en el fenómeno.

La pregunta 1.3 está vinculada al balance de energía de un circuito eléctrico formado por una batería, cables y bombillas o resistencias. El objetivo de esta pregunta era investigar la comprensión de los estudiantes acerca del rol y el significado de la ley de Ohm y de la ley de las mallas de Kirchhoff (expresión del principio de conservación de energía aplicado a circuitos). Y si había claridad de que la diferencia de potencial  $\Delta V$  se refiere a la caída de voltaje en la resistencia del circuito mientras que la fem  $\varepsilon$  es una magnitud que permite describir la energía suministrada al circuito. La respuesta correcta se puede explicar haciendo uso del principio de conservación de la energía que se puede expresar matemáticamente mediante la ecuación (ley de mallas de Kirchhoff)  $\varepsilon = iR$ , donde la fem mide el trabajo por unidad de carga realizado en la batería para separar cargas y crear una diferencia de potencial. Como la resistencia

interna es despreciable,  $iR$  mide la energía por unidad de carga consumida en el circuito. En este caso se obtiene el mismo valor para las ecuaciones (a) y (b), pero de este resultado no se puede inferir que  $\varepsilon$  y  $\Delta V$  son el mismo concepto.

Al igual que la pregunta anterior, la pregunta 1.4 está vinculada al balance de energía de un circuito eléctrico formado por una batería, cables y bombillas o resistencias. El objetivo de esta pregunta era investigar si los estudiantes entienden que la fuerza electromotriz de una pila no depende de la configuración del circuito al que se conecta, sino que es una propiedad que depende de los materiales de los que está construida. Y, por otra parte, que la diferencia de potencial entre sus bornes depende de la configuración del circuito. Para explicar correctamente el concepto de fem los estudiantes deben reconocer que la diferencia de potencial mide el trabajo por unidad de carga, realizado por fuerzas conservativas, cuando las cargas se mueven de un punto a otro en el circuito. Mientras que la fem mide el trabajo por unidad de carga (realizado por fuerzas no conservativas) llevado a cabo por el generador para crear una diferencia de potencial separando cargas. Así, el concepto de fem es una característica de la batería y se mantiene constante si la batería es la misma.

#### Cuadro 2.1 Cuestionario 1

##### Pregunta 1.1:

Cuando sobre un cristal de cuarzo en forma de paralelepípedo se ejercen fuerzas en dos de sus caras opuestas, en las otras caras se produce una redistribución de los iones que da lugar a una diferencia de potencial. En este fenómeno se basan los mecheros de cocina que producen chispas eléctricas para iniciar la combustión del gas.



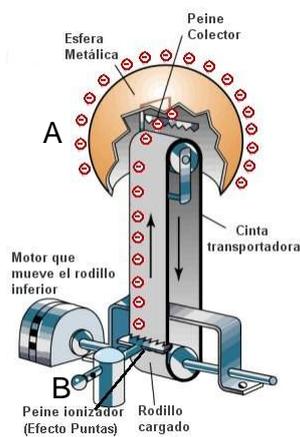
Se quiere usar este efecto como una fuente de fem. Sin embargo, un estudiante afirma que:

“Este efecto no se puede considerar como una fuente de fem, porque la separación de carga y la diferencia de potencial son causadas por una fuerza mecánica.”

¿El argumento es válido? Sí es así, explique su respuesta. Sí no es así, explique el error (es) y corríjalos.

### Pregunta 1.2

Como usted ya conoce el generador Van der Graaf es un dispositivo que mediante el rozamiento de una cinta de goma (en la zona B) separa cargas en dos zonas del generador. Acumula carga negativa en la esfera metálica (zona A) y carga positiva en la zona B (ver figura).

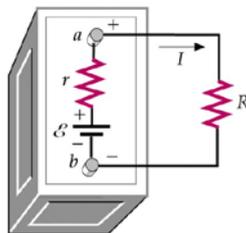


Cuando se conecta un alambre conductor entre la zona A y la zona B, se produce una corriente eléctrica.

¿Es correcto aplicar el concepto de fuerza electromotriz para explicar este fenómeno? Justifique su respuesta.

### Pregunta 1.3

Un resistor está conectado a los terminales de una batería con una resistencia interna despreciable  $r$ .



Explique cuál de las tres opciones que se indican a continuación describe el balance energético del circuito: a)  $\Delta V = iR$ ; b)  $\mathcal{E} = iR$ ; c) las dos.

**Pregunta 1.4**

Si la misma pila se conecta a distintos circuitos, ¿qué magnitud permanece constante: la diferencia de potencial entre sus bornes o la fuerza electromotriz de la pila?

**b. Segundo cuestionario**

Está conformado por tres preguntas (ver cuadro 2.2). La pregunta 2.1 y 2.3 se formularon teniendo en cuenta que el concepto de fem se aborda en dos contextos diferentes, en el programa habitual de Electromagnetismo: circuitos eléctricos DC y el fenómeno de inducción electromagnética. Esta última temática se acostumbra considerar posteriormente a la primera (no enseguida). A los estudiantes se les preguntó si se trata del mismo concepto de fem y lo que cambia es el modo de calcularla, o sí son conceptos diferentes. El objetivo de estas dos preguntas era investigar si los estudiantes entienden que la definición de fem es la misma en los dos contextos. Para contestar correctamente las preguntas 2.1 y 2.3, los estudiantes deben saber que el concepto de fem es único, independientemente del contexto físico; y que mide el trabajo por unidad de carga realizado por fuerzas no conservativas para transformar cualquier clase de energía (química, mecánica, etc.) a energía eléctrica.

La pregunta 2.2 aborda el concepto de fem asociado a una corriente inducida. Se les plantea a los estudiantes una situación en la que un campo magnético variable induce una fem y esta a su vez induce una corriente eléctrica en una espira cerrada de alambre. Se les preguntó si se inducía una diferencia de potencial. El objetivo de esta pregunta era indagar sobre las explicaciones de los estudiantes acerca de la naturaleza de la diferencia de potencial (relacionada con un campo eléctrico conservativo) y la naturaleza de la fem (relacionada con un campo eléctrico no conservativo). Para contestar correctamente la pregunta 2.2, los estudiantes deben entender que la diferencia entre fem y diferencia de potencial se debe a que miden diferentes tipos de acciones producidas por causas radicalmente diferentes.

**Pregunta 2.1**

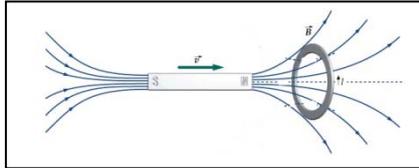
En el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos se consideran en temas diferentes, la fuerza electromotriz de una pila  $\mathcal{E}$  y la fuerza electromotriz de inducción  $\mathcal{E}$  ( $\mathcal{E} = d\phi/dt$ ). Dos estudiantes hacen las siguientes afirmaciones:

- E1: Se trata del mismo concepto, lo que cambia es el modo de calcularlo cuantitativamente.
- E2: Son conceptos diferentes. La primera  $\mathcal{E}$  considera la fuerza electromotriz en circuitos de corriente continua, y en el segundo caso se considera la fuerza electromotriz en situaciones de inducción electromagnética.

Indique cuál de los dos estudiantes tiene la razón y explique por qué.

**Pregunta 2.2**

Cuando un imán atraviesa con velocidad constante una espira (ver figura) se induce una corriente eléctrica en la misma. Explique si es correcta o no la siguiente afirmación: “Se ha inducido una diferencia de potencial en la espira y aparece una corriente eléctrica inducida”.



**Pregunta 2.3**

La figura *a* muestra un circuito eléctrico de corriente continua con una pila de 12 voltios de fuerza electromotriz. La figura *b* muestra un circuito de corriente inducida que tiene una fuerza electromotriz de 16 voltios.

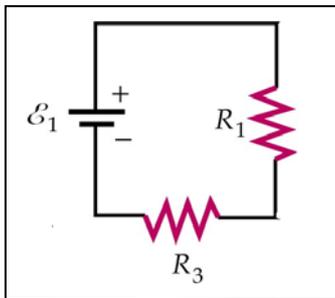


Figura *a*

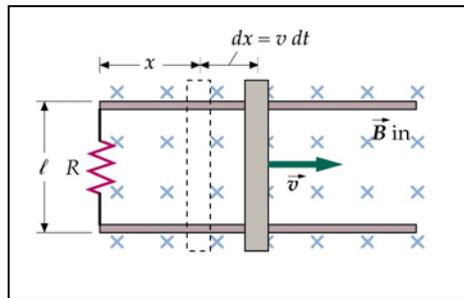


Figura *b*

Un estudiante afirma: “Aunque ambas magnitudes tengan la misma unidad, las dos fuerzas electromotrices responden a conceptos diferentes”

¿Está de acuerdo con esa afirmación?

Explique lo que entiende por fuerza electromotriz en las dos situaciones.

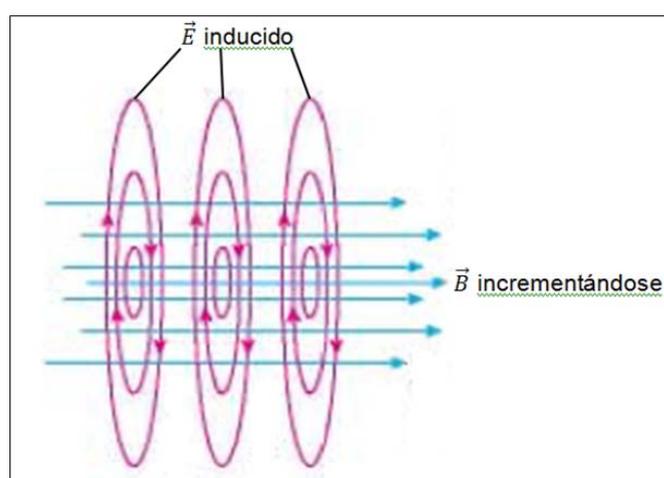
### c. Tercer cuestionario

Se diseñó con tres preguntas (ver cuadro 2.3), todas con un carácter tanto cualitativo como cuantitativo. La pregunta 3.1 presenta un circuito simple de corriente DC formado por una batería real, un resistor y cables ideales. Se especifica el valor de la fem de la batería (12 V), la resistencia interna (200  $\Omega$ ) y de la resistencia del resistor (1000  $\Omega$ ). A los estudiantes se les pide indicar, tanto en circuito abierto como cerrado, si la diferencia de potencial entre los bornes de la batería es mayor, menor o igual al valor de la fem dada. El objetivo no era sólo indagar si los estudiantes diferencian entre el concepto de fem y el concepto de diferencia de potencial; también se buscaba determinar el grado de comprensión conceptual al realizar el cálculo del voltaje. La respuesta científicamente correcta a la pregunta 3.1 tiene dos partes. Para el caso (a) como el circuito está abierto no hay corriente y la diferencia de potencial tiene el mismo valor que la fem de la batería (12 V). La caída de potencial a través del resistor es cero porque no hay corriente a través del circuito. Para el caso (b), cuando el circuito está cerrado la corriente en el circuito (aplicando la ley de las mallas de Kirchhoff) es  $i = \frac{\varepsilon}{r + R} = 0,01$  A. Entonces la diferencia de potencial entre los terminales a y b es  $\Delta V = iR = 10$  V.

En la pregunta 3.2 se considera un embobinado de alambre conductor ubicado en una región en la que hay un campo magnético que se incrementa uniformemente a razón de 0,025 T/s. Se especifica el valor del área de sección transversal del embobinado (0,012 m<sup>2</sup>) y su resistencia (5  $\Omega$ ). A propósito de esta situación, a los estudiantes se les formularon tres cuestiones. En las dos primeras se les pide indicar si se inducen una diferencia de potencial y una corriente eléctrica; en la tercera cuestión se les pide decir sí se induce una fem al reemplazar el embobinado conductor por uno aislante. En las tres cuestiones, si la respuesta es afirmativa se pide calcular la magnitud en

cuestión. Las respuestas científicamente correctas a estas tres cuestiones son: En el primer caso, no se induce una diferencia de potencial, porque el campo eléctrico inducido no es conservativo. En la segunda cuestión, si se induce una corriente porque se presenta el fenómeno de inducción electromagnética que induce una fem y esta induce una corriente en la bobina conductora. El valor de la corriente se calcula aplicando la ley de inducción de Faraday y la ley de las mallas de Kirchhoff:  $\mathcal{E} = d\phi/dt = A dB/dt = 0,003 \text{ V}$  (donde A es el área de sección transversal de la bobina), entonces  $i = \mathcal{E}/R = 0,6 \text{ mA}$ .

El objetivo de la pregunta 3.2 era indagar acerca de las ideas de los estudiantes sobre: (i) la diferencia entre fem y diferencia de potencial basados en los diferentes campos eléctricos que los producen (no conservativo y conservativo), y (ii) en el contexto del fenómeno de inducción electromagnética, la diferencia entre la fem inducida (siempre se induce) y la corriente inducida que sólo existe cuando hay un camino conductor cerrado.



**Figura 2.2** Líneas de campo eléctrico inducido alrededor de las líneas de campo magnético, en un solenoide muy largo.

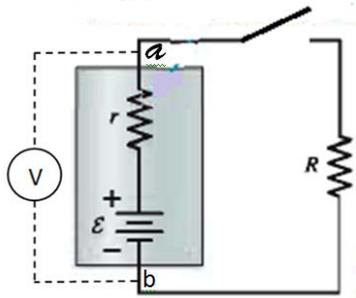
La pregunta 3.3 aborda una situación en la que se tiene un solenoide muy largo por el que circula una corriente variable que genera un campo magnético que aumenta uniformemente a razón de  $0,05 \text{ T/s}$ ; medio anillo metálico de radio especificado ( $0,02 \text{ m}$ ) rodea el solenoide en su parte media. A los estudiantes se les pregunta si se genera una diferencia de potencial en el anillo. El objetivo de esta pregunta era explorar la comprensión de los estudiantes acerca del

concepto de diferencia de potencial generado por un campo eléctrico conservativo, y su diferenciación de la fem inducida generada por un campo eléctrico no conservativo. La respuesta a la pregunta 3.3, de acuerdo con la teoría electromagnética, es que debido al campo magnético variable se presenta el fenómeno de inducción electromagnética en el medio anillo metálico. Por lo tanto, se induce un campo eléctrico no conservativo en el semi-anillo (ver figura 2.2). Así, el campo eléctrico no conservativo actúa sobre los electrones libres del anillo y produce una corriente transitoria. Al final del proceso se tendrán más electrones en la parte superior del semi-anillo que en la parte inferior. Esta separación de carga genera un campo eléctrico conservativo y por lo tanto una diferencia de potencial.

### Cuadro 2.3 Cuestionario 3

#### Pregunta 3.1

Una batería con una fem de 12 V y una resistencia interna de  $200\ \Omega$  está conectada en serie con un resistor de  $1000\ \Omega$  como muestra la figura.



a) Cuando el circuito está abierto, la diferencia de potencial entre los puntos a y b de la batería será:

- (i) Igual a 12 V      (ii) Mayor que 12 V      (iii) Menor que 12 V

Explique su respuesta e indique cómo calcularía la diferencia de potencial

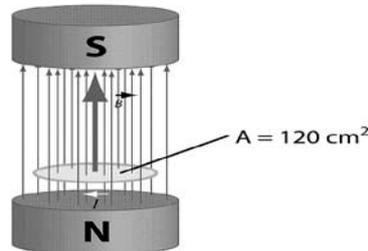
b) Cuando el circuito está cerrado y hay una corriente estacionaria, la diferencia de potencial entre los terminales a y b de la batería será:

- (i) Igual a 12 V      (ii) Mayor que 12 V      (iii) Menor que 12 V

Explique su respuesta e indique cómo calcularía la diferencia de potencial

### Pregunta 3.2

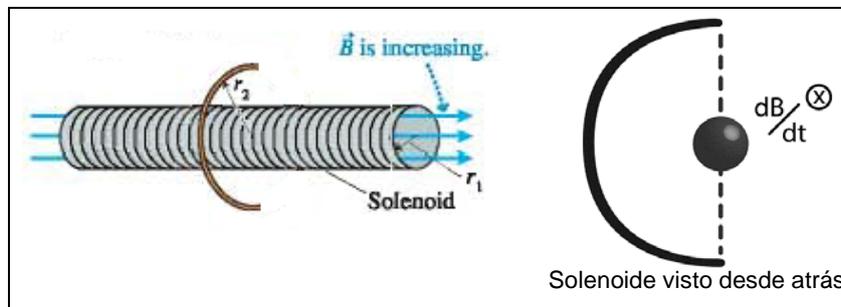
Una bobina conductora con área de sección transversal de  $0,012 \text{ m}^2$  y una resistencia de  $5 \Omega$ , está ubicado entre los polos de un electroimán que produce un campo magnético variable  $dB/dt = 0,025 \text{ T/s}$ .



- ¿Se induce una diferencia de potencial en la bobina? Si es así, explique cómo calcularla.
- ¿Hay una corriente inducida  $i$  en la bobina? Si es así, explique cómo calcularla.
- Cuando la bobina conductora es reemplazada por una bobina aislante ¿se induce una fem en la bobina? Si es así calcúlela.

### Pregunta 3.3

Un solenoide produce un campo magnético variable  $dB/dt = 0,05 \text{ T/s}$  en la dirección indicada en la figura. Como se observa hay medio anillo metálico con un radio de  $r_2 = 0.02 \text{ m}$ .



Cuando la situación es estacionaria en la mitad del anillo, ¿existe una diferencia de potencial? Si es así, explique por qué?

## 2.4.2 Entrevistas y Criterios de Análisis

Considerando que la entrevista es una herramienta de investigación, se usó en conjunción con los cuestionarios para abordar la pregunta número dos de esta investigación y, a su vez, contrastar la primera hipótesis (ver apartado 2.4). Se realizó un conjunto de preguntas y se registraron las respuestas mediante una grabadora de audio para su posterior análisis. Las entrevistas brindaron un

medio de reunir datos a través de una interacción oral directa con los estudiantes. Una ventaja de esta interacción es que permitió una mayor profundidad en el acceso a lo que está “dentro de la cabeza del estudiante”. Otra ventaja es que las entrevistas nos dieron la oportunidad de preguntar extensamente en comparación con la oportunidad limitada de los cuestionarios (en particular en la primera entrevista).

Es de notar, que a través de las entrevistas se buscaba profundizar en la estructura de razonamiento de los estudiantes que participaron. Por ejemplo, conocer mejor sus modos de justificar sus respuestas, y conocer más ampliamente los modelos, metáforas y analogías consideradas en sus razonamientos.

El tipo de entrevista que se llevó a cabo fue semiestructurada, es decir el contenido y los procedimientos se organizaron por anticipado, pero el entrevistador (el autor de este trabajo y profesores del grupo de investigación) tenían libertad de hacer complementaciones ajustadas a los objetivos de la investigación. Esta flexibilidad implica que fue una situación semiabierta. Como las preguntas eran de tipo generativo nos permitió indagar de modo que se podía penetrar más profundamente en la manera de entender de los estudiantes. La técnica de la primera entrevista fue en grupo, esto permitió propiciar la discusión entre los participantes, proporcionando así gama más amplia de respuestas. Mientras que la técnica de la segunda entrevista fue individual (Cohen y Manion 1990).

La primera entrevista se hizo considerando las preguntas del primer cuestionario (ver cuadro 2.1). Así, los criterios de análisis de esta entrevista coinciden con los de este cuestionario (ver apartado 2.4.1).

La segunda entrevista se hizo con base en dos preguntas (ver cuadro 2.4). La primera pregunta (I) propone considerar un imán que entra y sale de una bobina conectada a un galvanómetro, en la que se induce una corriente. En la pregunta II se plantea un circuito de corriente DC, formado por una batería real (con resistencia interna) y un resistor. En ambas preguntas se les pide a los estudiantes elegir de cuatro opciones, la definición del concepto de fem (según

el contexto) y argumentar su opción. La respuesta correcta, en ambos casos, es la opción (d) de acuerdo a los argumentos presentados en el apartado 1.2 (f). El objetivo de las preguntas I y II era explorar la definición del concepto de fem que tienen los entrevistados y los argumentos que proponen para fundamentarla.

#### **Cuadro 2.4 Entrevista 2**

##### **Pregunta I**

Como ya se ha visto en clase, al sacar y meter un imán dentro una bobina se induce una fuerza electromotriz y por tanto una corriente en la bobina.



Usted ¿cómo definiría el concepto de fem? Explique su respuesta.

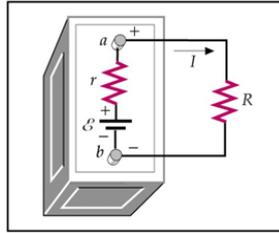
A la pregunta ¿Cómo define la fuerza electromotriz? Otros compañeros han respondido de la siguiente forma:

- a) Un dispositivo bobina-imán que ejerce el trabajo de mover las cargas por la bobina.
- b) La fuerza que realiza el trabajo de mover la unidad de carga por el circuito.
- c) La energía necesaria para generar corriente en la bobina.
- d) La magnitud que mide el trabajo que se realiza para mover la unidad de carga por la bobina.

¿Qué opina de cada una de las afirmaciones?, ¿son todas correctas desde el punto de vista científico?, ¿cuál cree que es la que mejor representa lo que has estudiado en el curso?

##### **Pregunta II**

Como ya ha visto en clase, la pila del circuito genera corriente a lo largo del mismo debido a la fuerza electromotriz que posee.



Usted ¿cómo definiría el concepto de fem? Explique su respuesta.

A la pregunta ¿Cómo define la fuerza electromotriz? Otros compañeros han respondido de la siguiente forma:

- a) Un dispositivo de la pila que ejerce el trabajo de mover las cargas por la bobina.
- b) La fuerza que realiza el trabajo de mover la unidad de carga por el circuito.
- c) La energía necesaria para generar corriente en el circuito.
- d) La magnitud que mide el trabajo que se realiza para mover la unidad de carga por el circuito.

¿Qué opina de cada una de las afirmaciones?, ¿son todas correctas desde el punto de vista científico?, ¿cuál cree que es la que mejor representa lo que has estudiado en el curso?

### 2.4.3 Criterios y protocolo de análisis de los libros de texto

Como se mencionó en el apartado 2.4, para abordar la pregunta número tres de esta investigación, y a su vez contrastar la segunda hipótesis, se diseñó un protocolo de análisis de libros de texto.

De acuerdo con lo mencionado en el apartado 2.3.4, los criterios para hacer el análisis de la presentación del concepto de fem en los libros de texto de Física General para nivel universitario se presentan a continuación.

#### a. Primer criterio: Presentación del concepto de fem

Como hemos visto en el apartado de historia 1.2, el concepto de fem tuvo que superar diferentes obstáculos epistemológicos que han dado lugar a discusiones sobre su significado incluso entre físicos contemporáneos (Fisher y Varney 1976, Varney y Fisher 1980, Roche 1987). Es importante que los libros de texto aborden explícitamente, tanto en el contexto de circuitos eléctricos de

corriente continua como en el estudio del fenómeno de inducción electromagnética, la definición del concepto de fem que está relacionada con la acción de campos eléctricos no conservativos. El objetivo de este criterio es evaluar la presentación en los libros de texto de las características más importantes que incluye la definición del concepto de fem. Así, se valora positivamente que se presente:

- a.1 Alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para explicar la noción de fem en relación con la acción de campos eléctricos no conservativos.
- a.2 Alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para enfatizar la diferencia entre acciones de campos eléctricos conservativos y no conservativos, tanto en el contexto de circuitos eléctricos DC como en el estudio del fenómeno de inducción electromagnética. En particular se explicita la diferencia epistemológica entre el concepto de fem y de diferencia de potencial.
- a.3 Alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para explicar que existe una sola manera de definir el concepto de fem (ver apartado 1.2.2.f), pero existen varias formas de calcularla y medirla, dependiendo del contexto en el que se calcula. En consecuencia, hacer notar que la fem inducida o la fem de una batería son diversas formas de generar una fem.

## **b. Segundo criterio: Perspectivas macroscópica y microscópica**

Para razonar en términos cualitativos, haciendo uso del concepto de fem, acerca de los fenómenos que ocurren en circuitos eléctricos y en el fenómeno de inducción electromagnética es necesario desarrollar modelos robustos de los procesos microscópicos subyacentes a ellos, los cuales llevan a los fenómenos observados y a sus explicaciones macroscópicas. El objetivo de este criterio es evaluar la presentación en los libros de texto de los fenómenos que se presentan en circuitos eléctricos y el fenómeno de inducción electromagnética, en relación al concepto de fem, desde una perspectiva

microscópica (modelo teórico) como macroscópica (por ejemplo mediciones y observaciones). Se valora positivamente el libro de texto que analiza las explicaciones macroscópicas y microscópicas (que vinculan el concepto de fem) en relación con los fenómenos que se presentan en circuitos eléctricos.

En consecuencia:

- b.1 Perspectiva macroscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica cómo se mide experimentalmente la fem de una pila a través de la medida del voltímetro de una pila en circuito abierto.
- b.2 Perspectiva microscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explicita que la medida del voltímetro representa el trabajo por unidad de carga realizado por la pila para suministrar energía a todo el circuito y mover los electrones.
- b.3 Perspectiva macroscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que enfatiza que el valor de la fem incluido en la ley de las mallas de Kirchhoff es una componente necesaria para aplicar el principio de conservación de la energía a los circuitos eléctricos

También se valora positivamente el libro de texto que analiza las explicaciones macroscópicas y microscópicas (que vinculan el concepto de fem) en relación con el fenómeno de inducción electromagnética. En consecuencia:

- b.4 Perspectiva macroscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica que la medida del voltímetro en un circuito RL (ubicado en el inductor) coincide con la fem inducida.
- b.5 Perspectiva microscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica que la medida del voltímetro representa la energía por unidad de carga suministrada por el campo eléctrico inducida no conservativo para mover los electrones en el caso que se tenga un circuito.

### **c. Tercer criterio: Oportunidades para trabajar las habilidades científicas y construir el conocimiento**

En el marco de la propuesta de organizar el aprendizaje de los alumnos como una construcción de conocimiento. Es decir, colocar a los estudiantes en situaciones por las que los científicos habitualmente pasan durante su formación y durante la que puedan familiarizarse mínimamente con lo que es el trabajo científico y sus resultados, abordando problemas conocidos por quienes dirigen su trabajo. El objetivo de este criterio es evaluar la presentación en los libros de texto de tareas propuestas o declaraciones que consideren el conocimiento previo o concepciones alternativas de los estudiantes acerca del concepto de fem tanto en el contexto de circuitos DC como de inducción electromagnética. En consecuencia:

- c.1 Se proponen actividades que involucran la elaboración de una hipótesis.
- c.2 Se proponen actividades que involucran el análisis de variables.
- c.3 Se proponen actividades en las que las explicaciones o modelos tienen que ser justificados, tanto en el marco de los circuitos DC como en el estudio de la inducción electromagnética.

### **d. Cuarto criterio: Ciencia en contexto**

Otro de los aspectos destacados por los resultados de la investigación en enseñanza/aprendizaje de la Física, son los aspectos axiológicos, es decir, los valores y actitudes que estimulan a los estudiantes a aprender y a tener una actitud positiva hacia el aprendizaje. Se valora positivamente las actividades o consideraciones sobre las relaciones ciencia, tecnología, sociedad y medio ambiente (CTSA). En concreto:

- d.1 En la introducción del concepto de fem se hace algún comentario declarativo o se propone alguna tarea que relaciona este concepto con otros capítulos y/o su importancia para el análisis energético de los fenómenos electromagnéticos.

- d.2 Se proponen por lo menos tres tareas o ejemplos que explican la utilidad del estudio del concepto de fem en relación a la vida cotidiana, la tecnología o la ciencia.

De acuerdo con los criterios de análisis presentados la tabla 2.2 corresponde al protocolo de análisis que se aplica a los libros de texto. En la segunda columna se indicará el porcentaje de respuestas afirmativas (Si) que significa que se contempla el criterio de forma satisfactoria, o negativas (No) que significa que no se contempla el criterio, o si menciona que implica que hay algún comentario sobre el criterio pero no se detienen a explicarlo.

**Tabla 2.2 Protocolo de análisis para los libros de texto**

Criterio de Análisis	Si/menciona/No
a.1 Se propone alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para explicar la noción de fem en relación con la acción de campos eléctricos no conservativos.	
a.2 Se propone alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para enfatizar la diferencia entre acciones de campos eléctricos conservativos y no conservativos, tanto en el contexto de circuitos eléctricos DC como en el estudio del fenómeno de inducción electromagnética. En particular se explicita la diferencia epistemológica entre el concepto de fem y de diferencia de potencial.	
a.3 Se propone alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para explicar que existe una sola manera de definir el concepto de fem, pero existen varias formas de calcularla y medirla, dependiendo del contexto en el que se calcula. En consecuencia, hacer notar que la fem inducida o la fem de una batería son diversas formas de generar una fem.	
b.1 Perspectiva macroscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica cómo se mide experimentalmente la fem de una pila a través de la medida del voltímetro de una pila en circuito abierto.	
b.2 Perspectiva microscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explicita que la medida del voltímetro representa el trabajo por unidad de carga realizado por la pila para suministrar energía a todo el circuito y mover los electrones.	
b.3 Perspectiva macroscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que enfatiza que el valor de la fem incluido en la ley de las mallas de Kirchhoff es una componente necesaria para aplicar el principio de conservación de la energía a los circuitos eléctricos.	

b.4	Perspectiva macroscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica que la medida del voltímetro en un circuito RL (ubicado en el inductor) coincide con la fem inducida.	
b.5	Perspectiva microscópica: Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica que la medida del voltímetro representa la energía por unidad de carga suministrada por el campo eléctrico inducida no conservativo para mover los electrones en el caso que se tenga un circuito.	
c.1	Se proponen actividades que involucran la elaboración de una hipótesis.	
c.2	Se proponen actividades que involucran el análisis de variables.	
c.3	Se proponen actividades en las que las explicaciones o modelos tienen que ser justificados, tanto en el marco de los circuitos DC como en el estudio de la inducción electromagnética.	
d.1	En la introducción del concepto de fem se hace algún comentario declarativo o se propone alguna tarea que relaciona este concepto con otros capítulos y/o su importancia para el análisis energético de los fenómenos electromagnéticos.	
d.2	Se proponen por lo menos tres tareas o ejemplos que explican la utilidad del estudio del concepto de fem en relación a la vida cotidiana, la tecnología o la ciencia.	

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y DESARROLLO ARGUMENTAL

*“Lamentaría, sin embargo, que lo que he dicho se entendiera como que la educación para el mejoramiento y profundización del entendimiento ha de ser necesariamente represiva para la imaginación, o que restrinja el ejercicio de la mente a simples procesos matemáticos o mecánicos”  
(Faraday 1849, p.480)*

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de los cuestionarios, el análisis de las entrevistas y el análisis de los libros de texto.

En lo que concierne a los resultados de la aplicación de los cuestionarios, se presentan los resultados y los análisis de tres cuestionarios cuyo propósito era conocer el nivel de comprensión de estudiantes de Ciencias e Ingeniería en cursos introductorios de física a nivel universitario de cuatro países, tres de Europa y uno Latinoamericano, acerca del concepto de fem en diferentes contextos.

En el análisis de las entrevistas se exponen los resultados obtenidos en dos entrevistas realizadas a dos grupos de estudiantes diferentes, uno de la Universidad Pedagógica Nacional – Colombia y otro de la Universidad del País Vasco – España. Con las entrevistas se buscaba constatar que los resultados obtenidos a través de los cuestionarios tenían reflejo en estas, y también poder ahondar en la estructura de razonamiento de los estudiantes que participaron en las entrevistas.

Y, en el análisis de los libros de texto se presenta la revisión de 16 libros de textos de física general, de nivel universitario. El propósito del análisis era identificar la forma de presentar el concepto de fem en diferentes contextos (circuitos eléctricos DC y fenómeno de inducción electromagnética). Los libros estudiados suelen ser utilizados como libros principales de consulta o libros de

texto en las universidades a nivel internacional en cursos introductorios de física.

### 3.1 Resultados de la Aplicación de los Cuestionarios

Se diseñaron y se aplicaron tres cuestionarios (ver cuadros 2.1, 2.2 y 2.3) con el propósito de valorar el grado de comprensión de estudiantes de nivel universitario acerca del concepto de fem en diferentes contextos.

Los cuestionarios se aplicaron a estudiantes de ingeniería y de física de España, Colombia, Bélgica e Irlanda; después que ellos habían estudiado el tema en clase. La investigación fue llevada a cabo en la Universidad del País Vasco (EHU), la Universidad Pedagógica Nacional (UPN), la Universidad Católica de Leuven (UKL) y la Universidad de Dublín (DCU), durante un periodo de cinco años. Esto implicó que la constitución del espacio de resultados de cada cuestionario se dio de manera colaborativa. Es decir, la autora de este trabajo tuvo la oportunidad de reflexionar sobre los datos y sus conclusiones con otros investigadores.

Además, los resultados y análisis de los cuestionarios fueron socializados en tres comunicaciones orales de tres eventos internacionales “on Physics education”, y en un artículo que se encuentra en revisión para ser publicado. Así:

- En el congreso: “GIREP-ICPE-MPTL 2010 International Conference” se presentaron los resultados del primer cuestionario en la ponencia titulada: ***The concept of electromotive force in the context of direct-current circuits: Students’ difficulties and guidelines for teaching*** que fue publicada en el libro de abstracts titulado “Teaching and learning Physics today: Challenges? Benefits?”.
- En el congreso: “9<sup>th</sup> International Conference ESERA 2011” se presentaron los resultados del segundo cuestionario en la ponencia titulada: ***Probing students’ understanding of the concept of electromotive force at university*** que fue publicada en el libro de abstracts titulado “Science Learning and Citizenship”.

- En el congreso: “WCPE-The World Conference on Physics Education 2012 (julio 1-6)” se presentaron los resultados del segundo cuestionario en la ponencia titulada: ***Investigating students understanding on the concepts of electromotive force and its differentiation from potential difference in electromagnetism.***
- En la revista Latin-American Journal of Physics Education (LAJPE) se encuentra en revisión el artículo titulado ***Research based teaching sequence of electromotive force in the context of dc circuits.***

Muchos investigadores que hacen uso de la fenomenografía trabajan individualmente durante el análisis de datos. Sin embargo, nosotros nos sumamos a aquellos autores que defienden la importancia de que haya más de un investigador durante el análisis para fomentar una mayor apertura de mente y conciencia de perspectivas alternativas, como un modo de mejorar el espacio de resultados final (Akerlind 2005).

Cada una de las respuestas de los estudiantes a las preguntas planteadas se analizó rigurosamente. En primer lugar, a partir de las respuestas de los estudiantes se proponía un conjunto borrador de categorías de descripción para cada una de las preguntas. A continuación se releían las respuestas de los estudiantes y se hacía una asignación tentativa de cada respuesta a una de las categorías borrador. Luego, los otros miembros del equipo de investigación llevaban a cabo esta última tarea de manera independiente. Posteriormente, cuando las respuestas ya habían sido clasificadas, se comparaba la distribución de las respuestas. Las categorías originales eran redefinidas hasta que se lograba un consenso. Cuando hubo desacuerdos acerca de alguna categoría de descripción o en la asignación de respuestas a una categoría específica, este fue resuelto teniendo como referencia las respuestas por ser la única evidencia de la comprensión de los estudiantes.

La discusión de la categorización de las respuestas de los estudiantes, se focalizó en determinar los modos cualitativamente diferentes en los cuales los estudiantes entienden el concepto de fem. Este proceso se produjo en dos niveles de análisis. Primero, intentamos identificar la concepción de fem que

era evidente en cada respuesta y segundo, buscamos clarificar las características de cada concepción comparándola y contrastándola con las otras concepciones que iban emergiendo.

En cada etapa de nuestras discusiones acerca de qué caracterizaba cada concepción leíamos las respuestas nuevamente, cada vez desde una perspectiva ligeramente diferente en la medida en que nuestra comprensión inicial de ellas se desarrollaba. Buscamos formular de manera progresiva descripciones más completas y refinadas. Esto último se hizo de la siguiente manera: continuamente buscábamos evidencia dentro de las respuestas que fuera consistente con las categorías propuestas o que estuviesen en conflicto con ellas. Este procedimiento fue llevado a cabo con cada una de las respuestas de tal manera que siempre se consideró la respuesta como un todo. Además, se buscó lo común de una respuesta con las otras dentro de una misma categoría. A través de este proceso se elaboraron conjuntamente las categorías de descripción basados en la evidencia de las respuestas.

Como se mencionó al presentar el enfoque metodológico de la fenomenografía (ver apartados 2.3.1 y 2.3.2), el investigador necesita estar dispuesto constantemente a ajustar su pensamiento a la luz de la reflexión, discusión y nuevas perspectivas. Manteniendo el enfoque en la información que está analizando y en las categorías de descripción que emergen como un conjunto, más que en información y categorías individuales, esto es esencial para mantener la atención en la comprensión colectiva. El proceso total fue marcadamente iterativo (lo que implica mirar los datos desde diferentes perspectivas en diferentes momentos) y comparativo, lo que implicó la continua clasificación y reclasificación de datos. Además de las comparaciones entre los datos y las categorías de descripción en desarrollo, también se debió hacer comparaciones entre las categorías mismas.

Todas las veces que se leía una respuesta, se tenía presente la pregunta ¿qué nos dice esto acerca del modo en que los estudiantes entienden el concepto de fem? En otras palabras, ¿qué significa fem para el estudiante si él o ella dice esto o aquello? Los estudiantes con frecuencia dicen cosas similares pero el significado subyacente puede ser diferente. Los estudiantes también expresan

ideas similares de modos bastante diferentes. Estas similitudes y diferencias sólo se pueden descubrir manteniendo todas las ideas en mente a la vez y pretendiendo elaborar una representación que permita explicar el significado subyacente de cada respuesta. Más específicamente, si el estudiante entiende el concepto de fem de un modo entonces no será sorprendente que él o ella interpreten algunas de las situaciones planteadas en coherencia con ese modo. Pero si el estudiante aborda otra situación considerando el concepto de otro modo es evidente preguntarse ¿a qué se debe esa diferencia?

### **3.1.1 Resultados del primer cuestionario**

El primer cuestionario (ver cuadro 2.1) fue implementado con estudiantes de España, Colombia y Bélgica. Todos los estudiantes habían cursado el primer año de universidad. En el caso de los estudiantes de España y Colombia por lo menos habían cursado dos años de física en los dos últimos años de secundaria y habían pasado los exámenes estándar nacionales para entrar a la universidad a estudiar ciencias o ingeniería.

En el primer año en la universidad, los estudiantes de España recibieron 3.5 horas de clase magistral y 2 horas de trabajo de laboratorio por semana, durante 14 semanas (segundo semestre) de electromagnetismo. Los temas de Electrostática y circuitos eléctricos fueron enseñados en un periodo de 5 o 6 semanas de este curso. En Colombia, los estudiantes recibieron 3 horas de clase magistral y 3 horas de trabajo de laboratorio por semana, durante 15 semanas (tercer semestre) de electromagnetismo I. Los temas de Electrostática y circuitos eléctricos fueron enseñados en un periodo de 8 a 9 semanas de este curso. En Bélgica, los estudiantes tuvieron 4 horas de clase magistral por una semana y 2 horas de talleres durante 10 semanas. En todos los casos las clases magistrales fueron dadas por profesores experimentados del Departamento de Física.

Este cuestionario se aplicó a estudiantes de primer año de ingeniería: 64 de la Universidad del País Vasco y 87 de la Universidad Católica de Leuven. Y a 50 estudiantes de primer año de física de la Universidad Pedagógica Nacional.

Los estudiantes expresaron diferentes significados del concepto de fem. Identificamos algunas dificultades de comprensión que parecen comunes a muchos estudiantes. La descripción de las ideas de los estudiantes se concentra en algunas dificultades específicas persistentes y en la interpretación de las mismas. En la tabla 3.1 se presentan las categorías de descripción que se establecieron a partir de las respuestas obtenidas.

Símbolo	Categorías de Descripción
A	Comprensión correcta del significado de fem.
B	Concepciones alternativas
B <sub>1</sub>	Fem como "fuerza" cuyo trabajo mueve cargas eléctricas.
B <sub>2</sub>	Confusión entre fem y diferencia de potencial <ul style="list-style-type: none"> <li>- Razonamiento basado en la fórmula.</li> <li>- El significado de fem y de diferencia de potencial es el mismo.</li> </ul>
B <sub>3</sub>	La ley de Ohm representa el balance de energía de un circuito eléctrico.
C	Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado.
C <sub>1</sub>	El concepto de fem no es usado
C <sub>2</sub>	Sí hay corriente eléctrica hay fem
D	No responden / incoherente

**Tabla 3.1 Categorías de Descripción basadas en las respuestas al primer cuestionario**

En lo que sigue se caracterizan las categorías de descripción. En la categoría *A-Comprensión correcta del significado de fem*, el enfoque está en el rol jugado por el concepto de fem como una magnitud que mide el trabajo por unidad de carga hecho para reorganizar las cargas y producir una diferencia de potencial en el contexto de dispositivos como las baterías o fuentes fem similares (ver apartado 1.2.2-f). Con frecuencia, la fem cuantifica energía no eléctrica por unidad de carga puesta en juego para separar cargas y generar una diferencia en el voltaje o energía no eléctrica por unidad de carga que permite medir variaciones en el campo magnético.

En la categoría B se abordan las concepciones alternativas del concepto de fem que tienen los estudiantes. La categoría B<sub>1</sub>- *fem como “fuerza” cuyo trabajo mueve cargas eléctricas*, la fem es considerada una fuerza mecánica. Hay un énfasis en el concepto de fuerza, y los estudiantes vinculan esta fuerza con la capacidad de realizar un trabajo para mover cargas.

En la categoría B<sub>2</sub>-*Confusión entre fem y diferencia de potencial*, al concepto de fem se le dan las mismas propiedades del concepto de diferencia de potencial eléctrico (*el significado de fem y de diferencia de potencial es el mismo*), lo que implica no distinguir entre el rol jugado por la fem y por la diferencia de potencial en el contexto de los circuitos eléctricos. Algunos estudiantes suponen que los conceptos de fem y diferencia de potencial son similares muy seguramente porque como en el caso de la pregunta 1.3 (ver cuadro 2.1) los algoritmos para calcular la fem y la diferencia de potencial en la resistencia coinciden. Es decir, *limitan su razonamiento a la fórmula empleada*.

En la categoría B<sub>3</sub>-*La ley de Ohm representa el balance de energía de un circuito eléctrico*, pone de manifiesto que algunos estudiantes asignan a la ley de Ohm el papel de la ley de las mallas de Kirchhoff (principio de conservación de la energía aplicado a circuitos) la cual describe el balance de energía del circuito completo. Algunas veces, cuando no hay circuito eléctrico, algunos estudiantes consideran que no hay fem.

El enunciado de la categoría C-*Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado*, describe el sentido de la misma. De acuerdo a lo identificado hacemos énfasis en las respuestas que no mencionan el rol jugado por la fem en un circuito eléctrico (C<sub>1</sub>-*El concepto de fem no es usado*). También se enfatiza con la categoría C<sub>2</sub>-*Sí hay corriente eléctrica hay fem*, tanto el uso de definiciones mal memorizadas como el supuesto equivocado de que la corriente es la causa de la fem.

Como las situaciones planteadas en el primer cuestionario están presentadas en diferentes contextos, se suponía que llegar a la respuesta correcta era más o menos complicado para los estudiantes dependiendo del contexto. La

descripción de las categorías refleja estas diferencias en la complejidad de la asignación de las respuestas. Para cada una de las preguntas, había por lo menos tres categorías diferentes de respuestas que incluían algún tipo de consideración del concepto de fem y que se muestra en la tabla 3.2. Hay una categoría en cada pregunta que incluye todos los elementos que corresponden a una comprensión del concepto de fem coherente con la de los expertos (categoría A).

Los resultados obtenidos en las tres muestras de las tres universidades mencionadas se presentan como porcentajes en la tabla 3.2. A continuación se hace un análisis de los resultados y se presentan ejemplos de las respuestas de los estudiantes de cada una de las universidades, y de cada una de las preguntas. La respuesta a una pregunta específica se indica con la letra R (inicial de la palabra respuesta) y el número de la pregunta.

- Una minoría de estudiantes reconoce que la fem es una magnitud que mide el trabajo por unidad de carga hecho por una fuente de fem, como una batería, para suministrar energía eléctrica (categoría A). La principal diferencia entre las respuestas correctas depende de la situación presentada. En situaciones que involucran movimiento transitorio de cargas (preguntas P1.1 y P1.2) el porcentaje no alcanza el 10%, mientras que este se incrementa a 15-18% en situaciones que involucran circuitos eléctricos con un flujo continuo. Esto, sin embargo, es un porcentaje bastante más bajo de lo que se podría esperar de estudiantes en su primer curso de ciencias e ingeniería después de haber estudiado este tema.

Algunos ejemplos de respuestas clasificadas en esta categoría son:

EHU – R1.1: *“Se puede aplicar el concepto de fem ya que es lo que mide el trabajo mecánico por unidad de carga que se realiza para polarizar el cristal”*

UPN – R1.1: *“La fem es el trabajo por unidad de carga que produce una “separación de carga” y haciendo que se separen las cargas se genera una diferencia de potencial”*

EHU – R1.2: *“Para separar las cargas en la zona A y B la cinta tiene que realizar un trabajo que se mide por la fem. La afirmación del estudiante no es correcta”*

CATEGORÍAS DE DESCRIPCIÓN	P1.1			P1.2			P1.3			P1.4		
	UPN (N=50)	EHU (N=64)	UKL (N=87)	UPN (N=50)	EHU (N=64)	UKL (N=87)	UPN (N=50)	EHU (N=64)	UKL (N=87)	UPN (N=50)	EHU (N=64)	UKL (N=87)
A. Comprensión correcta del significado de fem	6%	6,5%	2%	8%	8%	13%	10%	9,5%	5%	20%	15%	37%
B. Concepciones alternativas:												
B <sub>1</sub> . Fem como “fuerza” cuyo trabajo mueve cargas eléctricas	50%	47%	8%	20%	17%	8%	8%	2%	12,5%	14%	17%	1%
B <sub>2</sub> . Confusión entre fem y diferencia de potencial	4%	15,5%	34%	6%	26,5%	11%	54%	53%	57,5%	22%	40%	16%
- Razonamiento basado en la fórmula.							22%	33%	15,5%			
- El significado de fem y de diferencia de potencial es el mismo.							20%	5%	17%			
B <sub>3</sub> . La ley de Ohm representa el balance de energía de un circuito eléctrico							12%	15%	25%			
C. Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado	18%	12,5%	31%	20%	18,5%	12%	20%	16%	11%	26%	14%	20%
C <sub>1</sub> . El concepto de fem no es usado				16%	8%	45%						
C <sub>2</sub> . Sí hay corriente eléctrica hay fem	6%	4,5%	3%	10%	11%	-						
D. No responden / incoherente	16%	14%	22%	20%	11%	10%	8%	24%	9,5%	18%	14%	26%

**Tabla 3.2 Resultados obtenidos con el primer cuestionario**

UPN – R1.2: *“...es importante aclarar que para generar una corriente es necesario tener una diferencia de potencial, y para generar esta diferencia es necesario tener una fem, ya que se basa en llevar cargas de un bajo potencial a un elevado potencial generando una diferencia de potencial... el generador es como una pequeña fem.”*

EHU – R1.3: *“la conservación de la energía en un circuito viene dada por la energía producida que mide la magnitud fem y la energía consumida en el circuito que se mide mediante  $IR + Ir$ . En este caso sólo tenemos  $IR$  que coincide con la diferencia de potencial”*

UPN – R1.3: *“El balance energético lo podemos explicar con (b), ya que la ecuación (a) es aplicable sólo a materiales óhmicos y no es una ley general para los circuitos eléctricos”*

EHU – R1.4: *“Permanece constante la fem de la pila ya que en presencia de distintos circuitos la diferencia entre bornes varía y la fem se queda constante por mitad de carga”*

UPN – R1.4: *“Se mantiene la fuerza electromotriz ya que es un valor constante de la batería y que sólo depende de la fuente mientras que la diferencia de potencial depende de la configuración del circuito”*

- *Fem como una fuerza que hace trabajo o como energía:*

Las preguntas P1.1 y P1.2 fueron diseñadas para determinar el modo en que los estudiantes emplean el concepto de fem en contextos diferentes al de un circuito eléctrico con una batería. Se les preguntó a los estudiantes acerca de lo adecuado de analizar las situaciones propuestas haciendo uso del concepto de fem. Un número significativo de respuestas asociaron la fem con una fuerza que realiza trabajo (categoría B<sub>1</sub>). Hubo una minoría que asoció fem con energía o la transformación de energía a través del dispositivo o la batería.

El porcentaje de explicaciones en esta categoría se reduce a alrededor de un 10% cuando el contexto es un circuito eléctrico con una corriente constante (preguntas P1.3 y P1.4).

Algunos ejemplos de respuestas clasificadas en esta categoría son:

EHU – R1.1: *“es cierto el razonamiento del estudiante, podemos hablar de fem gracias a la fuerza que hacemos”*

UPN – R1.1: *“La fuerza electromotriz se puede representar como un trabajo ya sea mecánico o de otro tipo que transforma la energía, en este caso la chispa se produce porque la fem transforma la energía”*

UKL – R1.1: *“la fem mide la tensión que se le aplica sobre el cuarzo”*

EHU – R1.2: *“para conseguir esa distribución de cargas existe una fuerza electromotriz”*

UPN – R1.2: *“Si es aplicable ya que podemos observar el trabajo realizado por esta fuente cuando se mueve la banda transportadora”*

UKL – R1.2: *“No es correcta porque si no hay una fuerza que genera una diferencia de potencial pasará corriente”*

EHU – R1.3: *“la opción b) porque la fem es la que mueve a los electrones”*

UPN – R1.3: *“La (c) porque  $\varepsilon = iR$  describe la cantidad de trabajo que se realiza sobre las cargas para separarlas y  $V = iR$  informa sobre la variación del potencial existente en los diferentes puntos del circuito”*

UKL – R1.3: *“la (c) puesto que la diferencia de potencial indica la energía necesaria para que prenda el bombillo, y la fem indica el tipo de energía que recibirá el bombillo”*

EHU – R1.4: *“la fuerza electromotriz permanece constante ya que es el trabajo que aporta la pila con independencia del circuito exterior”*

UPN – R1.4: *“la fem de la pila permanece constante, ya que dentro de ésta se siguen produciendo las mismas transformaciones, es decir el mismo trabajo sobre las mismas cargas. Además, por lo anterior también permanece constante la diferencia de potencial”*

- *Tendencia a confundir la fem con diferencia de potencial:*

Se diseñaron dos situaciones (preguntas P1.3 y P1.4) en las que se usa un circuito de corriente continua para analizar las justificaciones de los estudiantes en el cálculo del balance de energía en el circuito. Estas preguntas no podían ser respondidas sin hacer uso del concepto de fem. En este contexto, la tendencia en la mayoría de respuestas (categoría B<sub>2</sub>) es atribuir las mismas características del concepto de fem al concepto de diferencia de potencial, tal que en el contexto de un circuito eléctrico con una corriente continua ellos no proporcionan ninguna distinción significativa entre un concepto y el otro. Por ejemplo:

EHU – R1.1: *“Al tener una diferencia de potencial tendremos fem”*

UPN – R1.2: *“No existe fem sino separación de cargas que genera una diferencia de potencial”*

EHU – R1.3: *“la fuerza electromotriz es igual al voltaje, por tanto la c)”*

UPN – R1.3: *“La respuesta es la (c) porque si no se cambia ni la bombilla ni nada en el circuito, la fem, que en este caso es fem de la batería es igual a la diferencia de potencial del circuito”*

EHU – R1.4: *“En este caso hablar de fem o de diferencia de potencial es lo mismo ya que se refiere a la energía necesaria para mover a los electrones por el circuito”*

UPN – R1.4: *“Permanece constante la diferencia de potencial porque es igual para todos los circuitos, mientras que la fem dentro de la batería debe aumentar para llevar a todos los circuitos la misma diferencia de potencial; esto se refleja en un aumento de la corriente que transita por cada circuito”*

La confusión entre las propiedades del concepto de fem y las del concepto de diferencia de potencial revela que para justificar que ambos conceptos tienen el mismo significado físico, los estudiantes emplean diferentes estrategias de argumentación:

- (i) Justificación basada en la fórmula que “parece” atribuir el mismo significado físico a dos magnitudes que tienen el mismo valor dentro de una situación determinada. Alrededor de un 20% de los estudiantes confían más en los resultados cuantitativos ofrecidos por una ecuación que en argumentos lógicos basados en hechos. Por ejemplo:

EHU – R1.3: *“como no hay resistencia interna  $\mathcal{E} = \Delta V + i \cdot 0 = \Delta V$ , opción c)”*

UPN – R1.3: *“Como la resistencia es despreciable no hay diferencia entre  $\Delta V$  y  $\mathcal{E}$ . La opción es la (c)”*

Una variante es la creencia de que la diferencia de potencial produce fuerza electromotriz. En muchos de las respuestas se aprecia una tendencia creciente a suponer que al abordar circuitos de corriente continua, se asume que la batería o el generador Van der Graaff produce una diferencia de potencial y que esta produce la fem. Este tipo de razonamiento ha sido incluido en la categoría C. Por ejemplo:

EHU – R1.4: *“la batería produce diferencia de potencial y esta permanece constante ya que si el circuito varía, la fem varía porque esta es la que hace el trabajo de liberar cargas”*

- (ii) La generalización excesiva entre situaciones con circuitos y alguna otra situación. Algunos estudiantes tienen la tendencia a asociar el concepto de fem con situaciones que involucran un circuito eléctrico con una batería y creen que este concepto sólo se puede definir bajo estas condiciones. Por ejemplo:

EHU – R1.2: *“Si no hay circuito eléctrico o pila, no hay fem”*

- (iii) Fijación funcional con la ley de Ohm (Categoría B<sub>3</sub>). Esto lleva a los estudiantes a excluir un análisis cualitativo de un problema, que justifique el algoritmo seleccionado en la resolución. Entre un 12% de estudiantes de la UPN y 25% de la UKL consideran que la ley de Ohm es un principio general de la electricidad, es decir que la ley de Ohm no sólo se puede aplicar a materiales óhmicos, sino también al circuito completo para evaluar el balance de energía del mismo. Por ejemplo,

EHU – R1.3: *“ $\Delta V = iR$  ya que nos encontramos ante un circuito con una resistencia y no ante un circuito con un campo magnético que induciría una fuerza electromotriz”*

UPN – R1.3: *“ $\Delta V = iR$  describe el balance energético del circuito”*

Las dificultades de los estudiantes parecen estar fuertemente vinculadas a la ausencia de un análisis del trabajo llevado a cabo sobre el circuito y su balance de energía. En este sentido, muchos estudiantes aun no entienden claramente la utilidad de los conceptos de fem y diferencia de potencial, ni en situaciones que involucran movimiento transitorio de cargas ni en el caso de movimiento continuo de estas. En todos los casos, encontramos evidencia de una dificultad principal: el error de asociar el concepto de fem con la cantidad que mide el trabajo hecho para suministrar energía al circuito completo, tanto fuera como dentro de la batería.

Las dificultades identificadas tienen implicaciones directas para la enseñanza. En resumen, muchos de las dificultades de los estudiantes en el análisis del rol de la fem se debe a que ellos la asocian con una “fuerza” o una energía que conduce cargas a través del cable conductor. La falta de un significado

adecuado para el concepto de fem lleva a muchos estudiantes a confundirlo con el concepto de potencial eléctrico. Con frecuencia los estudiantes atribuyen propiedades del concepto de diferencia de potencial al concepto de fem y viceversa. De manera similar, en situaciones con circuitos eléctricos de corriente continua, para calcular el balance de energía en el circuito completo los estudiantes hacen una sobre generalización aplicando la ley de Ohm.

### **3.1.2 Resultados del segundo cuestionario**

El segundo cuestionario (ver cuadro 2.2), al igual que el primer cuestionario, fue implementado con estudiantes de España, Colombia y Bélgica. Todos los estudiantes habían cursado el primer año de universidad. En el caso de los estudiantes de España y Colombia por lo menos habían cursado dos años de física en los dos últimos años de secundaria y habían pasado los exámenes estándar nacionales para entrar a la universidad a estudiar ciencias o ingeniería.

En el apartado anterior (3.1.1) se describen las características generales de los cursos de electromagnetismo que los estudiantes de las muestras recibieron en cada una de sus universidades antes de aplicar el cuestionario. Este fue aplicado a estudiantes de primer año de ingeniería: 77 de la Universidad del País Vasco y 85 de la Universidad Católica de Leuven. Y a 64 estudiantes de primer año de física de la Universidad Pedagógica Nacional.

Con el segundo cuestionario el interés estaba en determinar si los estudiantes de ingeniería y de física realmente eran capaces de aplicar y entender el concepto de fem en el contexto de la inducción electromagnética en un circuito. Los estudiantes expresaron diferentes significados del concepto de fem. Identificamos algunas dificultades de comprensión que parecen comunes a muchos estudiantes. En la tabla 3.3 se presentan las categorías de descripción que se establecieron a partir de las respuestas obtenidas. Algunas de estas categorías coinciden con las del primer cuestionario.

Símbolo	Categorías de Descripción
A	Comprensión correcta del significado de fem
B	Hay dos conceptos de fem
B <sub>1</sub>	Razonamiento basado en la “causa” que produce la fem
B <sub>2</sub>	Razonamiento basado en el contexto
C	Confusión entre fem y diferencia de potencial
D	Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado.
E	No responden / incoherente

**Tabla 3.3 Categorías de Descripción basadas en las respuestas al segundo cuestionario**

En lo que sigue se caracterizan estas categorías de descripción. La categoría *A-Comprensión correcta del significado de fem* coincide con la categoría A del primer cuestionario (ver apartado 1.2.2-f). La categoría *B- Hay dos conceptos de fem*, ilustra el supuesto de los estudiantes de que existen dos conceptos diferentes de fem. En la categoría *B<sub>1</sub>-Razonamiento basado en la “causa” que produce la fem*, el razonamiento de los estudiantes explica la fem a partir del efecto que se genera en el contexto de la electrocinética. Mientras que la explicación para la fem inducida se basa en el modo en que ésta es generada, es decir, cómo es causada. Los estudiantes entienden que hay dos conceptos de fem diferentes porque su causa u origen es diferente. Y la categoría *B<sub>2</sub>-Razonamiento basado en el contexto*, se puede considerar como una generalización de B<sub>1</sub>, en el sentido que las explicaciones de los estudiantes no se basan en un razonamiento causal para distinguir dos significados de fem. Más bien, ellos fundamentan su distinción en las características del contexto donde es producida.

La categoría *C- Confusión entre fem y diferencia de potencial*, coincide con la categoría B<sub>2</sub> de las categorías establecidas en el análisis del primer cuestionario. Así mismo, la categoría D se corresponde con la categoría C y la categoría E con la categoría D. Por lo tanto la descripción de C, D y E es la misma de las categorías B<sub>2</sub>, C y D del apartado anterior.

Los resultados obtenidos en las tres muestras de las tres universidades mencionadas se presentan como porcentajes en la tabla 3.4. A continuación se hace un análisis de los resultados y se presentan ejemplos de las respuestas de los estudiantes de cada una de las universidades, y de cada una de las preguntas.

- Hay una minoría de respuestas en la categoría A. Pocos estudiantes se enfocan en el rol jugado por la fem como una magnitud que mide el trabajo por unidad de carga hecho por fuerzas no conservativas para medir la habilidad de ciertos sistemas no eléctricos para crear corrientes eléctricas (Baterías, generador mecánico, etc.) o desarrollar fuerzas sobre partículas cargadas si la región no incluye un conductor. Aunque las variaciones entre los diferentes grupos de estudiantes pero aun así las repuestas correctas no exceden el 20%. Además, cuando la pregunta se enfoca en resaltar el rol jugado por fuerzas no conservativas en la definición de fem, el porcentaje de respuestas cae y no sobrepasa el 10% (pregunta 2.2). Cuando se analizaron las respuestas el criterio fue considerar “respuesta correcta” en un sentido amplio de su significado.

Algunos ejemplos de esta categoría se muestran a continuación:

*EHU – R2.1: “El estudiante E1 está en lo correcto porque la fem es el trabajo por unidad de carga llevado a cabo para mover las cargas. Esta definición no cambia y por lo tanto el concepto de fem es el mismo aunque se calcule diferente en un circuito o en la inducción”*

*UPN – R2.1: “La afirmación del estudiante E1 es correcta porque el concepto de fem es el mismo. Como la fem producida por la batería y la fem inducida se producen de manera diferente, usted las debe calcular de manera diferente pero el concepto es el mismo”*

*UKL – R2.3: “E1 está en lo correcto. En la figura a, la fem viene de la batería y es simplemente causada por la diferencia de potencial. En la figura b, el voltaje es causado por la barra en movimiento en un campo magnético”*

CATEGORÍAS DE DESCRIPCIÓN	P2.1			P2.2			P2.3		
	UPN (N=64)	EHU (N=77)	UKL (N=85)	UPN (N=64)	EHU (N=77)	UKL (N=85)	UPN (N=64)	EHU (N=77)	UKL (N=85)
A. Comprensión correcta del significado de fem	19%	19,5%	7%	8%	8%	7%	6%	20%	3,5%
B. Hay dos conceptos de fem:									
B <sub>1</sub> . Razonamiento basado en la "causa" que produce la fem	20%	35%	19%	8%	8%	-	24%	37,5%	37,5%
B <sub>2</sub> . Razonamiento basado en el contexto	26,5%	23,5%	12%	-	-	-	28%	12,5%	10,5%
C. Confusión entre fem y diferencia de potencial	6%	2,5%	15%	42%	45%	42%	14%	4%	15,5%
D. Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado	17%	8%	19%	30%	31%	46%	20%	14,5%	12%
E. No responden / incoherente	11%	11,5%	28%	12%	8%	5%	8%	11,5%	21%

Tabla 3.4 Resultados obtenidos con el segundo cuestionario

- *Hay dos conceptos de fem:*

Aproximadamente la mitad de las respuestas en las preguntas 2.1 y 2.3 explican que el concepto de fem tiene dos significados diferentes. Para fundamentar esto los estudiantes emplean dos estrategias diferentes (categorías B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub>). Los siguientes ejemplos ilustran el razonamiento basado en la “causa” que produce la fem:

EHU – R2.1: *“Es correcta ya que la fem en una batería es causada por la diferencia de potencial que existe entre los extremos de la batería y, en el fenómeno de inducción la fem es producida por la variación en el flujo magnético o la variación en el campo magnético”*

UPN – R2.1: *“los dos conceptos son diferentes, la fem de una pila es creada mediante reacciones químicas y la fuerza electromotriz de inducción es creada mediante un campo magnético.”*

UKL – R2.3: *“Correcta. En el segundo caso se considera un cambio de flujo en la barra. En el caso 1 se considera el voltaje de una batería, así la energía química es convertida a una diferencia de potencial”*

Los siguientes ejemplos ilustran los argumentos basados en el contexto:

EHU – R2.3: *“Hay dos conceptos diferentes, uno se refiere a la fem en un circuito y el otro se refiere a una fem en un fenómeno de inducción magnética”*

UPN – R2.1: *“Son dos conceptos diferentes porque en cada uno se aborda el concepto de campo desde una perspectiva diferente. En el primer caso se habla del trabajo que se necesita efectuar sobre una carga para llevarla de un potencial a otro; y en el segundo caso se habla de una variación en el tiempo del flujo magnético”*

- *Confusión entre fem y diferencia de potencial:*

Una proporción significativa de respuestas en la categoría B emplean los conceptos de fem, voltaje y diferencia de potencial como sinónimos en sus explicaciones. Esto puede implicar que los estudiantes no tienen su propio significado para cada uno de estos conceptos y, además, no los identifican como magnitudes que miden fenómenos físicos diferentes. Esta confusión aparece claramente en las respuestas clasificadas en la categoría C en más del 40%. Por ejemplo:

EHU – R2.3: *“La fem cuantifica la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera. Por lo tanto, no importa que la diferencia de potencial sea producida por un fenómeno de inducción o por una batería. La fem es el mismo concepto”*

UPN – R2.1: *“Estoy de acuerdo con el estudiante 1, ya que se emplea el mismo concepto de fem para analizar fenómenos eléctricos como magnéticos, debido a que en ambos casos hay separación de carga que genera una diferencia de potencial, lo que cambia es el contexto.”*

UKL – R2.1: *“El estudiante 2 está en lo correcto. Por supuesto ambos casos consideran un voltaje, pero una batería siempre libera un voltaje directo y corriente directa, y se puede calcular por  $\mathcal{E} = iR$ . Un voltaje inducido es causado por un cambio en el campo/flujo magnético. Por lo tanto este voltaje no siempre es constante, ya que si el campo magnético no cambia, no hay  $\mathcal{E}$  y su valor depende del cambio de  $\phi_B$ ,  $\mathcal{E} = \frac{d\phi_B}{dt}$ ”*

Más del 40% de las respuestas a la pregunta 2.2 explícitamente indican una mezcla entre los conceptos de fem y diferencia de potencial, como lo ilustran los siguientes ejemplos:

EHU – R2.2: *“Si, es correcta. A medida que el imán se acerca al anillo se produce una corriente y por lo tanto una diferencia de potencial”*

EHU – R2.2: *“Es verdad. A medida que el imán se acerca, las líneas de campo pasando a través del anillo se incrementan y se induce una corriente eléctrica, lo que implica una diferencia de potencial  $\Delta V = iR$ ”*

UPN – R2.2: *“Al introducir el imán, se induce una diferencia de potencial variable en el anillo”*

Las dificultades de los estudiantes parecen estar frecuentemente ligadas a la ausencia de un análisis acerca del trabajo llevado a cabo por fuerzas conservativas y no conservativas en sistemas que crean corriente eléctrica, ya sea por ejemplo baterías, termocuplas o sistemas que involucran el fenómeno de inducción electromagnética. Así mismo, ausencia de análisis del balance de energía de estos sistemas.

Coincidiendo con los resultados de otras investigaciones (ver apartado 1.1.1) se puede interpretar que cuando el contexto está dentro de circuitos eléctricos, la mayoría de los estudiantes no tienen claridad acerca de qué es fem, y por lo tanto se habla de la batería como un generador de fem, de manera similar a una “caja negra”. Por esa misma razón, ellos no hablan de transformación de energía química en energía eléctrica, ni del campo no conservativo. De otro

lado, en el contexto del fenómeno de inducción, el énfasis está en la causa que genera la fem (variación en el tiempo de flujo magnético) describiendo cómo se genera. Desde esta perspectiva, ya que la mayoría de los estudiantes supone que así como las causas que producen la fem son diversas, existen diferentes conceptos de fem.

Muchos estudiantes no entienden claramente la utilidad y diferencia entre los conceptos de fem y diferencia de potencial, ni en situaciones que involucran circuitos de corriente directa ni en circuitos de corriente alterna que involucran los dos conceptos.

### **3.1.3 Resultados del tercer cuestionario**

El tercer cuestionario (ver cuadro 2.3), fue implementado con estudiantes de España, Colombia, Bélgica e Irlanda. Todos los estudiantes habían cursado el primer año de universidad. En el apartado 3.1.1 se describen las características generales de los cursos de electromagnetismo que los estudiantes de España, Colombia y Bélgica recibieron en cada una de sus universidades antes de aplicar el cuestionario. Los estudiantes de Irlanda eran de ingeniería quienes ya habían hecho el curso de Análisis Vectorial; estudiantes de física quienes ya habían hecho un curso de electromagnetismo basado en Cálculo, y futuros profesores de física quienes habían hecho un curso de física basado en álgebra.

El número de la muestra de estudiantes en el caso de la de la Universidad del País Vasco es diferente en cada pregunta, porque cada una se aplicó a grupos distintos así: 65 estudiantes (pregunta 3.1), 83 (pregunta 3.2) y 76 (pregunta 3.3). En la Universidad Pedagógica se aplicó a 31, en la Universidad Católica de Leuven a 53 y en la Universidad de Dublín a 34.

Con el tercer cuestionario el interés estaba en determinar si los estudiantes de ingeniería, física y futuros profesores de ciencias realmente eran capaces de aplicar y entender el concepto de fem, diferenciarlo de otros conceptos como el de diferencia de potencial y elaborar argumentos cualitativos y cuantitativos tanto en el contexto de circuitos de corriente DC (pregunta 3.1) como en el

contexto de la inducción electromagnética en un circuito cerrado o abierto (preguntas 3.2 y 3.3).

Los estudiantes expresaron diferentes significados del concepto de fem. Identificamos algunas dificultades de comprensión semejantes a las establecidas en el análisis del primer y segundo cuestionarios. En la tabla 3.5 se presentan las categorías de descripción que se establecieron a partir de las respuestas obtenidas. Algunas de estas categorías coinciden con las de los dos primeros cuestionarios.

**Tabla 3.5 Categorías de Descripción basadas en las respuestas al tercer cuestionario**

<b>Símbolo</b>	<b>Categorías de Descripción</b>
A	Comprensión correcta del significado de fem
A <sub>1</sub>	Diferenciación entre fem y diferencia de potencial <ul style="list-style-type: none"> <li>- Basado en el análisis del balance de energía haciendo uso de la ecuación</li> <li>- Basado en el análisis del balance de energía sin usar la ecuación</li> <li>- Basado en la naturaleza no conservativa del campo eléctrico.</li> <li>- Basado en el análisis correcto del efecto de inducción en un conductor</li> </ul>
A <sub>2</sub>	Diferenciación entre fem inducida y corriente eléctrica
B	Confusión entre fem y otros conceptos relacionados
B <sub>1</sub>	Fem y diferencia de potencial son el mismo concepto o ellos tienen el mismo valor.
B <sub>2</sub>	Confusión entre fem inducida y corriente.
C	Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado
C <sub>1</sub>	No mencionan fem. Ninguna corriente o circuito abierto implica que la diferencia de potencial es constante (12V) o cero.
C <sub>2</sub>	No mencionan fem. La resistencia causa disipación de energía o caída de potencial.
C <sub>3</sub>	No mencionan fem. Aplican la ley de Ohm como principio general para analizar el balance de energía en el circuito.
C <sub>4</sub>	Parte A: B variable produce diferencia de potencial No hay diferencia de potencial porque el lazo no es un circuito.

C <sub>5</sub>	Parte B: No mencionan fem. Hay corriente porque hay inducción.
C <sub>6</sub>	Parte C: En un aislador no hay corriente y por lo tanto no hay fem En un aislador no hay B y por lo tanto no hay fem.
C <sub>7</sub>	Confusión entre corriente y fem o diferencia de potencial.
D	Explicación poco clara o incoherente
E	No responden / no explica

En lo que sigue se caracterizan estas categorías de descripción. La categoría *A-Comprensión correcta del significado de fem* se ha subdividido en las categorías A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> para especificar los elementos que se han tenido en cuenta para considerar una respuesta coherente con el significado de fem. La categoría B- *Confusión entre la noción de fem y otros conceptos relacionados*, ilustra la tendencia de un gran número de estudiantes de mezclar los significados de diversos conceptos con el de fem. Está subdividida en dos categorías. En la categoría B<sub>1</sub>- *Fem y diferencia de potencial son el mismo concepto o ellos tienen el mismo valor*, es decir, al concepto de fem se le dan las mismas propiedades que las del concepto de diferencia de potencial eléctrico, lo que implica no distinguir entre el rol jugado por la fem y por la diferencia de potencial tanto en el contexto de los circuitos eléctricos como en el contexto del fenómeno de inducción electromagnética. Esta categoría coincide con la categoría B<sub>2</sub> del primer cuestionario y con la categoría C del segundo cuestionario. La categoría B<sub>2</sub>- *Confusión entre fem inducida y corriente*, ilustra una tendencia habitual de los estudiantes de suponer que la corriente inducida genera la fem inducida. Y, la categoría C- *Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado*, se ha subdividido en siete categorías que ponen de manifiesto la reincidencia de muchos estudiantes en ciertas confusiones.

Los resultados obtenidos en las cuatro muestras de las cuatro universidades mencionadas se presentan como porcentajes en la tabla 3.6. En esta tabla los resultados de la primera cuestión en cada pregunta están en color negro, los resultados de la segunda cuestión están en color rojo y los resultados de la tercera cuestión están en color azul. A continuación se hace un análisis de los

resultados y se presentan ejemplos de las respuestas de los estudiantes a cada una de las preguntas y de cada una de las universidades.

- Hay una minoría de respuestas en la categoría A. En el caso de la pregunta 3.1, las respuestas correctas a la cuestión A no superan el 25% mientras que las respuestas a cuestión B es de aproximadamente 39%. Para la pregunta 3.2, que tenía tres cuestiones, los porcentajes de respuestas correctas no superan para A el 3.5% y para B y C el 8.5%. Y en el caso de la pregunta 3.3 las respuestas correctas no llegan al 14%. Esto es un porcentaje bastante más bajo de lo que se podría esperar de estudiantes en su primer curso de ciencias e ingeniería después de haber estudiado este tema. Es posible que la notable diferencia entre los porcentajes de la primera pregunta y los de las otras dos (3.2 y 3.3) refleje que hay mayores dificultades de comprensión del concepto de fem en el contexto de la inducción electromagnética que en el de circuitos eléctricos. Cuando se analizaron las respuestas el criterio fue considerar “respuesta correcta” en un sentido amplio de su significado. Algunos ejemplos de respuestas clasificadas en esta categoría son:

*EHU – R3.1(parte A): “Como el circuito está abierto no hay corriente.  $V_{ab} = \mathcal{E} - ir$  pero  $i = 0$ . Así,  $V_{ab} = \mathcal{E} = 12V$ ”*

*DCU – R3.1(parte A): “Cuando el interruptor está abierto la diferencia de potencial es igual a la fem”*

*UPN – R3.1(parte B): “Es 12 V. Como el circuito está abierto no hay corriente, por lo tanto no hay caída de potencial”*

*UKL – R3.2(parte A): “Como el campo magnético está variando en el tiempo genera una fuerza electromotriz y como hay una resistencia en la espira, la diferencia de potencial será:  $\Delta V = \mathcal{E} = d\Phi/dt = BL$ ”*

**Tabla 3.6 Resultados obtenidos con el tercer cuestionario**

CATEGORÍAS DE DESCRIPCIÓN	P3.1				P3.2				P3.3			
	UPN (N=31)	EHU (N=65)	UKL (N=53)	DCU (N=34)	UPN (N=31)	EHU (N=83)	UKL (N=53)	DCU (N=34)	UPN (N=31)	EHU (N=76)	UKL (N=53)	DCU (N=34)
A. Comprensión correcta del significado de fem:	0% 38,7%	24,5% 23%	24% 23%	9% 6%	3,2% 0% 3,2%	3,5% 8,5% 8,5%	8% 0% 4%	0% 0% 3%	0%	13,2%	6%	0%
B. Confusión entre fem y otros conceptos relacionados:  B <sub>1</sub> . Fem y diferencia de potencial son el mismo concepto o ellos tienen el mismo valor.  B <sub>2</sub> . Confusión entre fem inducida y corriente.	-  -	-  -	-  -	-  -	41,9% 29%	17% 35%	15% 13%	12% 3%	25,8%	30,3%	6%	3%
C. Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado:	54,8% 35,5%	50% 37%	48% 45%	53% 61%	6,5% 25,8% 19,4%	17% 17% 21,7%	41,5% 50% 55%	3% 12% 12%	16,1%	15,8%	13%	12%
D. Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado	25,8% 19,4%	17% 24,5%	21% 15%	29,5% 32%	19,4% 16,1% 6,5%	19% 17% 13%	21% 28% 15%	21% 32% 12%	22,6%	19,7%	34%	29%
E. No responden / incoherente	19,4% 6,5%	10% 15,4%	6% 8%	15% 0%	29% 29% 58,1%	23% 23% 25%	13% 9% 23%	65% 53% 59%	35,5%	21%	34%	56%

- En la categoría B- *Confusión entre fem y otros conceptos relacionados*, las respuestas a las preguntas 3.2 y 3.3 ponen de manifiesto que persiste (teniendo en cuenta los resultados de los dos primeros cuestionarios) la confusión entre fem y diferencia de potencial ( $B_1$ ). Las respuestas a las cuestiones A y B de la pregunta 3.2 oscilan entre el 3% y el 41.9%. De manera similar, las respuestas a la pregunta 3.3 oscilan entre el 3% y el 30.3%. Por ejemplo:

EHU – R3.2(parte A): *“Hay fuerza electromotriz y su valor es el mismo de la diferencia de potencial:  $\varepsilon = -d\Phi/dt = -S dB/dt = -0,0003V$ ”*

UPN – R3.2(parte A): *“Si hay, Como la diferencia de flujo con respecto al tiempo es igual a la diferencia de potencial  $\frac{d\phi}{dt} = \frac{dV}{dt} = \frac{dB}{dt} A + B \frac{dA}{dt} = \frac{dB}{dt} A = 3 \times 10^{-4} \text{ Tm}^2/\text{s}$ ”*

UPN – R3.2(parte B): *“Si hay corriente inducida porque hay una diferencia de potencial”*

EHU – R3.2(parte B): *“The value of intensity is:  $I = V/R = dB/dt / R = 0.025/ 5 = 0.005$ ”*

En el marco del fenómeno de inducción electromagnética se observa que los estudiantes tienen la tendencia a confundir el concepto de fem con el de corriente (categoría  $B_2$ ). En este sentido, las respuestas a la cuestión C de la pregunta 3.2 oscilan entre un 4% y un 31.3%. Veamos algunos ejemplos:

UPN – R3.2(parte C): *“Si hay variación del campo, quiere decir que hay corriente inducida”*

EHU – R3.2(parte C): *“Como el campo magnético está variando hay una corriente inducida en el lazo”*

- Categoría C- *Razonamiento incorrecto basado en una asimilación deficiente del conocimiento que ellos han recordado.*

En el caso de la categoría  $C_1$ - *No mencionan fem. Ninguna corriente o circuito abierto implica que la diferencia de potencial es constante (12V) o cero* (ver tabla 3.5), es notable la similitud en el porcentaje de respuestas (entre el 31% y el 44%) a la cuestión A de la pregunta 3.1, en las cuatro universidades. Por ejemplo:

EHU – R3.1(parte A): *“Como no hay corriente la diferencia de potencial es 12V”*

UPN – R3.1(parte A): *“como no hay corriente no se da una caída de potencial porque no pasa corriente por la resistencia, así que es 12V”*

DCU – R3.1(parte A): *“Debido a que el interruptor está abierto ninguna corriente fluye así que el voltaje no cambia”*

En el caso de la categoría C<sub>2</sub>- *No mencionan fem. La resistencia causa disipación de energía o caída de potencial*, las respuestas a la cuestión A de la pregunta 3.1 están basadas en la pérdida de energía en la resistencia interna de la batería. Los porcentajes oscilan entre el 3% y el 16,1%. Veamos algunos ejemplos:

EHU – R3.1(parte A): *“Como hay una resistencia interna hay una caída de potencial. La diferencia de potencial es menor que 12V”*

UPN – R3.1(parte A): *“Es 12V, ya que la diferencia de potencial de un extremo al otro de la pila es igual al potencial que disipa la pila”*

La categoría C<sub>3</sub>- *No mencionan fem. Aplican la ley de Ohm como principio general para analizar el balance de energía en el circuito*, considera las respuestas a la cuestión A de la pregunta 3.1 que hacen uso de la ley de Ohm para calcular el cambio en la diferencia de potencial. Por ejemplo:

EHU – R3.1(parte A): *“Como no hay caída de potencial a través de los resistores. Así,  $V_{ab} = V_{battery} + V_{internal\ r} + V_R = V_b + r I + R I$ ; como  $I = 0$ :  $V_{ab} = V_b + 0 + 0 = 12\ V$ ”.*

La categoría C<sub>4</sub>- *B variable produce diferencia de potencial. No hay diferencia de potencial porque el lazo no es un circuito*. Incluye algunas de las respuestas a la cuestión A de la pregunta 3.2. Los porcentajes son bastante variados entre las cuatro universidades, el mínimo es del 3% y el máximo es del 41,5%. Por ejemplo,

EHU – R3.2(parte A): *“No hay diferencia de potencial en el lazo porque el lazo es una circunferencia y las cargas no pueden ser acumuladas”*

La categoría C<sub>5</sub>- *No mencionan fem. Hay corriente porque hay inducción*. Incluye algunas de las respuestas a la cuestión B de la pregunta 3.2. Los porcentajes van desde el 12% hasta el 50%. Por ejemplo:

EHU – R3.2(parte B): *“Como el campo magnético está variando hay una corriente inducida en el lazo”*

UPN – R3.2(parte B): *“Hay corriente inducida porque cambia el campo”*

La categoría C<sub>6</sub>- considera dos aspectos de las respuestas a la cuestión C de la pregunta 3.2: (i) *En un aislador no hay corriente y por lo tanto no hay fem* y (ii) *En un aislador no hay B y por lo tanto no hay fem*. Los porcentajes van desde el 12% hasta el 55%. Por ejemplo:

EHU – R3.2(parte C): *“El campo magnético en los aisladores es cero y por lo tanto no hay corriente”*

UPN – R3.2(parte C): *“Cuando el embobinado es no conductor el flujo magnético es nulo y por ende no hay fem”*

Por último, la categoría C<sub>7</sub>- *Confusión entre corriente y fem o diferencia de potencial*. Incluye algunas de las respuestas a la pregunta 3.3. Es notable la similitud de los porcentajes (entre el 12% y el 16,1%) en las cuatro universidades. Veamos algunos ejemplos:

EHU – R3.3: *“El campo magnético variable induce una corriente en el anillo y como  $V = IR$ , se genera una diferencia de potencial”*

DCU – R3.3: *“Si, el campo magnético induce flujo de corriente”*

UPN – R3.3): *“De acuerdo a la figura el anillo no está cerrado entonces no hay diferencia de potencial”*

En todos los casos, encontramos evidente que las dificultades de los estudiantes están estrechamente ligadas a la falta de significado de la noción de fem. Los resultados del estudio muestran que es necesario en la Enseñanza señalar explícitamente algunos aspectos claves del concepto de fem, tales como: (i) la fem está relacionada con acciones no conservativas; (ii) Una manera de expresar la noción de fem es en relación al trabajo por cada unidad de carga para mover cargas; (iii) El concepto de fem es único y otra manera de expresarlo es como la medida de la energía transferida por unidad de carga en el proceso de transformación de energía de alguna forma (química, electromagnética, mecánica, etc.) a energía eléctrica mide; (iv) Es necesario justificar que la diferencia entre fem y diferencia de potencial se debe a la

medida de diferentes tipos de acciones producidas por causas radicalmente diferentes.

### **3.2 Análisis de las Entrevistas**

Considerando que la entrevista es un espacio que le permite al estudiante argumentar en un ambiente de interacción con otros, y que esta argumentación social es un poderoso vehículo para desarrollar pensamiento de orden más alto que la argumentación interna (ver apartado 2.3.3), se realizaron dos entrevistas. La primera se hizo con base en el primer cuestionario (ver cuadro 2.1), y las preguntas de la segunda entrevista aparecen en el cuadro 2.4. Con las entrevistas se buscaba constatar que los resultados obtenidos a través de los cuestionarios tenían reflejo en estas, y también poder ahondar en la estructura de razonamiento de los estudiantes que participaron en las entrevistas. Más específicamente, profundizar en sus modos de explicar, modelar y representar el concepto de fem en diferentes contextos y en relación a otras nociones.

Se entrevistaron estudiantes de la Universidad del País Vasco - España y de la Universidad Pedagógica Nacional – Colombia. Las entrevistas fueron transcritas para obtener datos para un análisis en tres etapas. La primera etapa se enfocó en identificar y describir las concepciones en términos de sus significados globales. Esto se hizo marcando y segmentando lo transcrito de acuerdo a las concepciones de fem expresadas. La segunda etapa del análisis se enfocó en identificar el aspecto estructural de cada una de estas concepciones. Estas fueron estudiadas en detalle, para identificar dentro de cada una los elementos característicos, e idear una descripción de cada aspecto estructural de cada concepción alternativa.

En la tercera etapa del análisis el propósito fue analizar los argumentos de los estudiantes enunciados para justificar una concepción particular, teniendo como referente el modelo de argumento de Toulmin y el campo de argumentación (teoría electromagnética). Se enfatizó la valoración de dos dimensiones de los argumentos científicos. Primero medición de la capacidad

conceptual y, segundo medición de la calidad epistemológica (ver apartado 2.3.3).

### 3.2.1 Análisis de la primera entrevista

La primera entrevista basada en las preguntas del primer cuestionario (ver cuadro 2.1) fue llevada a cabo con cinco estudiantes de Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional, quienes previamente habían contestado por escrito este cuestionario. Uno de los estudiantes era sobresaliente por su rendimiento académico (lo notamos con E1) y se encontraba en el quinto año de la Licenciatura (último año), otros dos eran de rendimiento medio (E2 y E3) y se encontraban en el cuarto año y dos estudiantes, uno de rendimiento medio (E4) y el otro bajo (E5), estaban cursando el tercer año. Es decir, todos ya habían hecho los dos cursos de electromagnetismo previstos en el pensum.

Después de analizar el audio y la transcripción de las entrevistas, las concepciones, en términos de sus significados globales, que se aprecian y algunos de los ejemplos que las ilustran son:

- *Comprensión correcta del significado de fem:*

E1-R1.1: *“El estudiante no tiene la razón porque no sólo se genera fem mediante un generador de corriente, se puede generar de varias maneras”*

E2-R1.1: *“La respuesta del estudiante no es acertada, porque el concepto de fem se relaciona con una transformación de energía, por ejemplo se tiene cualquier tipo de energía y la finalidad es que termine en energía eléctrica”*

E3-R1.2: *“Si se puede aplicar el concepto de fem, porque comparando esto con la pila voltaica donde se ponen monedas y papeles con vinagre se genera una corriente pequeña... y creo que esto está en el principio de una fem”*

E5-R1.4: *“La fuerza electromotriz en el caso de la batería tiene un valor ya dado, por la configuración de la batería como tal; entonces esa fuerza electromotriz va a mantenerse constante solamente lo que va a cambiar sería la diferencia de potencial, pero dependiendo de la configuración del circuito”*

- *Fem como una fuerza que hace trabajo, como trabajo o como energía:*

E5-R1.1: *“La respuesta no es correcta por que el trabajo mecánico realizado sobre el cristal para separar las cargas debe corresponder a la fem”*

E1-R1.4: *“Lo que se mantiene constante es la diferencia de potencial entre sus bornes porque la fuerza electromotriz sería el trabajo que haría para separar las cargas, entonces según el circuito si tiene más resistencia más le cuesta separar las cargas, pero la diferencia de potencial va a ser la misma”*

- *Confusión entre fem y diferencia de potencial:*

E4-R1.2: *“Si se puede aplicar porque si uno tiene una diferencia de potencial la puede asociar con el concepto de fem cuando hay una corriente”*

E5-R1.2: *“No se puede aplicar porque no existe fem, la corriente se genera porque hay presente una diferencia de potencial”*

E4-R1.3: *“Mi respuesta es la (a), porque tengo entendido que cuando el circuito está cerrado la diferencia de potencial es igual a la fem; cuando el circuito está abierto no”*

E3-R1.4: *“Veo ligados a los dos conceptos, entonces diría que como que para que exista la fuerza electromotriz, tiene que haber una diferencia de potencial... yo diría que los dos son constantes”*

Como se puede apreciar en estos ejemplos, los estudiantes expresan diferentes significados del concepto de fem, dependiendo del contexto en el que lo tengan que aplicar. Llama la atención que el mismo estudiante puede enunciar un argumento coherente con la definición de fem en una situación particular (por ejemplo E3-R1.2) y en otra situación poner en evidencia que no tiene suficiente claridad del concepto (E3-R1.4). Esto muestra que hay interacción entre las preguntas formuladas y las concepciones expresadas.

En general, se hace evidente que se confirman las categorías establecidas en la tabla 3.1 y por lo tanto el aspecto estructural (en qué se enfocan) de cada una de estas concepciones (ver apartado 3.1.1).

A continuación se considera el modelo de argumento de Toulmin para analizar algunos de los argumentos de los estudiantes, enunciados para justificar sus concepciones particulares. Asimismo, como se dijo previamente, se juzga la calidad del argumento teniendo en consideración la capacidad conceptual y la calidad epistemológica (ver apartado 2.3.3).

En la figura 3.1 se presenta el argumento de E5-R1.1 haciendo uso del MAT, enunciado para dar su interpretación de la situación planteada en la pregunta 1.1 del primer cuestionario. D que es la base de la afirmación que se presenta en la conclusión (C) corresponde a la situación planteada en dicha pregunta. La garantía (G) es la proposición que indica cómo a partir de D se pasa a C. Esta proposición indica que el estudiante relaciona el trabajo con la fem; pero si bien es cierto que el trabajo está relacionado con la fem, ella no es la medida del trabajo. Una manera científica de definir fem es el trabajo por unidad de carga realizado para separar cargas (ver apartado 1.2.2.f). Es decir, posiblemente el estudiante supone que trabajo y trabajo por unidad de carga son expresiones equivalentes. Esta falta de dominio en el razonamiento que involucra razones o cocientes es uno de los vacíos más graves y extendidos en el desarrollo cognitivo de los estudiantes, y es uno de los impedimentos más serios (Arons 1997) para comprender magnitudes físicas cuya definición involucra cocientes de otras magnitudes dimensionalmente no homogéneas (que nos dice cuánto del numerador está asociado con una unidad de la magnitud en el denominador), como es el caso de la fem. La conclusión (C) en el contexto de la pregunta 1.1 es una afirmación correcta, pero G pone en evidencia que la idea que subyace a tal afirmación no es coherente con la definición de fem aceptada. El respaldo (R) que consolida G, es decir son las proposiciones que permiten que G tenga autoridad y vigencia: en este caso reafirma la noción de fem del estudiante (clasificada en la categoría B de la tabla 3.1), y además supone que esa definición es de Faraday. Posiblemente, esto último, se deba a que vincula la ley de inducción de Faraday con la definición que ofrece. El calificativo o matizador (M) que indica la fuerza conferida por G en el paso entre D y C. En este caso, una manera de interpretarlo es que el estudiante no está muy seguro de la coherencia de su afirmación en relación a la teoría electromagnética. Por último, en el argumento no se mencionan condiciones de refutación (E) que son las circunstancias en que la autoridad general de la garantía G ha de dejarse a un lado, es decir pueden hacer descartar o rechazar la conclusión C.

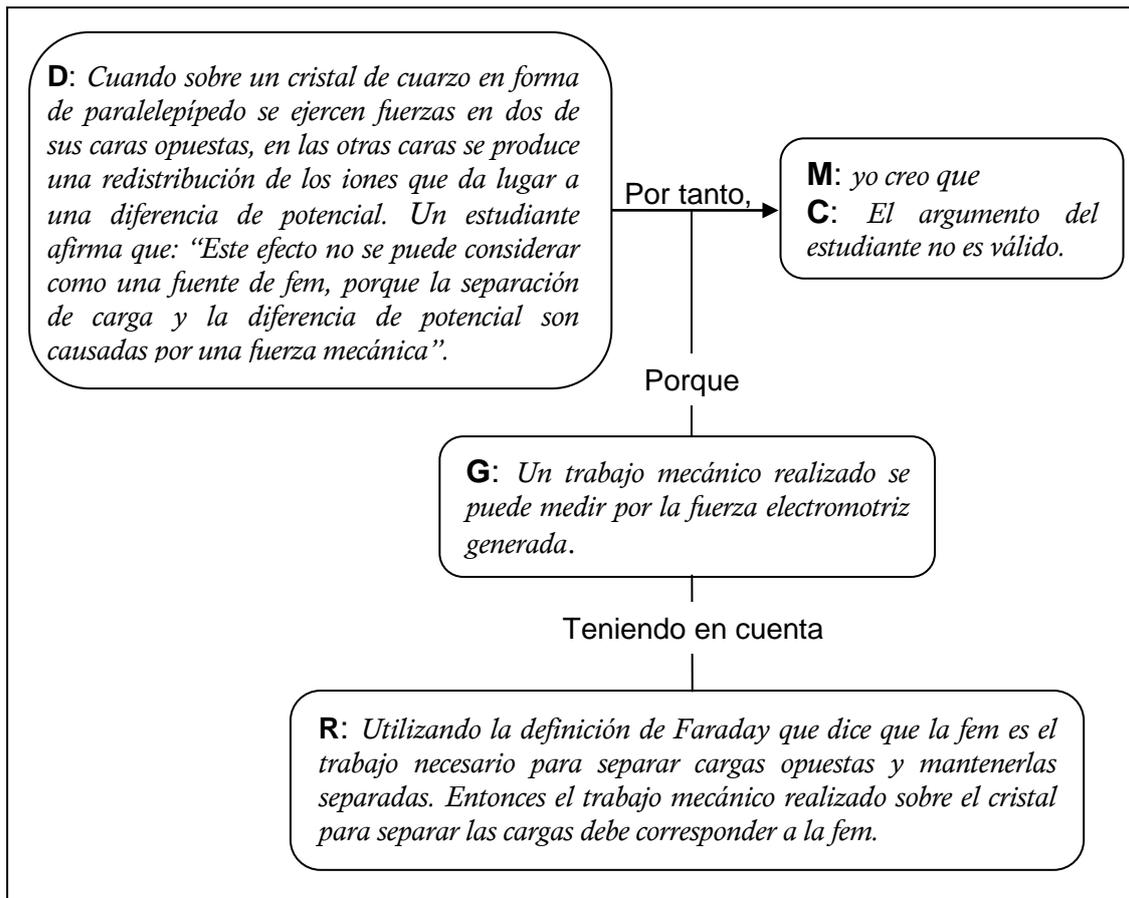


Figura 3.1 Modelo de argumento de Toulmin de E5-R1.1

A propósito de la calidad epistemológica del argumento, la justificación (G) de C no aborda la afirmación del estudiante hipotético que aparece en D, acerca de que “...la separación de carga y la diferencia de potencial son causadas por una fuerza mecánica”. Esto implica que G es insuficiente para justificar C. Por otro lado, al afirmar en G que “un trabajo mecánico se puede medir por...” al parecer confunde la noción de medir una magnitud con la de calcularla. Y, por último, la primera parte del razonamiento expresado en R: “utilizando la definición de Faraday...” y de acuerdo al contexto de la entrevista, tiene visos de ser un argumento de autoridad. En este caso, de ser así, no se tiene en cuenta la naturaleza de los argumentos científicos.

En la figura 3.2 se presenta el argumento de E4-R1.3 haciendo uso del MAT, enunciado para dar su interpretación de la situación planteada en la pregunta 1.3. Y que hemos clasificado en la categoría B<sub>2</sub> de la tabla 3.1.

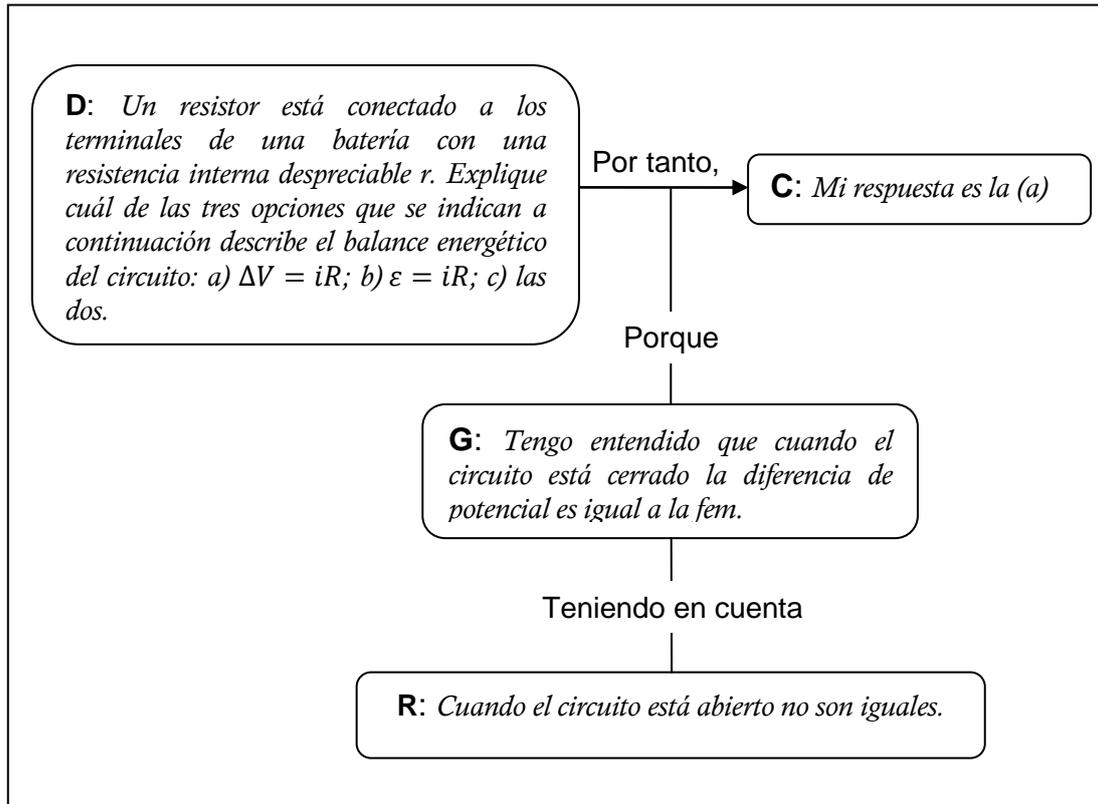


Figura 3.2 Modelo de argumento de Toulmin de E4-R1.3

De acuerdo a la estructura del MAT, D que es la base de la afirmación que se presenta en C corresponde a la situación planteada por la pregunta 1.3. La conclusión (C) es una afirmación incorrecta porque supone que la ley de Ohm proporciona un medio para calcular el balance energético de un circuito, es decir no tiene presente que esta ley sólo es aplicable a materiales óhmicos y por lo tanto no es aplicable a otros elementos del circuito. La proposición G, que indica cómo a partir de D se pasa a C, revela que el estudiante supone que si el *valor* de la fem y la diferencia de potencial son iguales, además de sus unidades, entonces el significado de estas dos magnitudes coincide. Esto último también es corroborado por el respaldo (R) cuyo papel es consolidar G. Así, tanto G como R implican que el estudiante presume que el significado de un concepto físico, como el concepto de fem, depende del contexto en el que se use. En el argumento esgrimido por el estudiante no menciona un calificativo o matizador (M). Tampoco se hace mención de condiciones de refutación (E).

A propósito de la calidad epistemológica del argumento, es evidente que en G y R hay insuficiencia en la información ofrecida para justificar la conclusión C.

Por otro lado, al parecer el estudiante al hacer uso de la palabra “igual” supone que esta es sinónimo de las expresiones “estar definido por” o “es idéntico a”. En símbolos, es suponer que el signo “=” es equivalente al signo “≡”. En algunos cálculos puede ocurrir que  $\Delta V = \mathcal{E}$ , pero esto sólo indica que los valores y las unidades de estas dos magnitudes coinciden, pero no significa que  $\Delta V \equiv \mathcal{E}$ . Posiblemente el estudiante no es consciente de que esta última expresión no es una ecuación en el sentido de, por ejemplo,  $y = 3x^2 + 2x$ . Esto nos indica que es importante llevar a los estudiantes a ver cómo surgen signos como estos, ya que no es algo que los estudiantes perciban o articulen espontáneamente.

Al estudiante se le pide que describa el balance energético del circuito, esto implica aplicar el principio de conservación de la energía al sistema completo. Al afirmar que la opción que describe ese balance es la ley de Ohm (opción a) está asignando el mismo estatus ontológico a una ley general de la física y a una ley experimental. Entre otras características, las leyes generales no son derivables mientras que las leyes experimentales (como su nombre lo indica) si lo son. Además, la ley de Ohm sólo es aplicable a los elementos resistivos (y óhmicos) del circuito mientras que la ley de las mallas de Kirchhoff (principio de conservación de la energía aplicado a circuitos) se aplica al circuito completo.

En la figura 3.3 se presenta el argumento de E5-R1.4 haciendo uso del MAT, enunciado para dar su interpretación de la situación planteada en la pregunta 1.4. Este caso tiene un elemento de interés adicional en comparación con los dos anteriores. De los cuales el primero fue clasificado en la categoría de descripción  $B_1$  de la tabla 3.1, mientras que el segundo fue clasificado en la categoría  $B_2$  de la misma tabla. El argumento de E5-R1.4 se puede clasificar tanto en  $B_1$  como en  $B_2$ , como se puede apreciar en el análisis que sigue.

De acuerdo a la estructura del MAT, D que es la base de la afirmación que se presenta en C corresponde a la situación planteada por la pregunta 1.4. La conclusión (C) es una afirmación incorrecta porque le asigna al concepto de diferencia de potencial propiedades del concepto de fem. La proposición G, que indica cómo a partir de D se pasa a C, revela que el estudiante confunde el concepto de fem con el concepto de trabajo. En este sentido se puede aplicar,

en lo que respecta a esta confusión, el mismo análisis hecho en la presentación del MAT de E5-R1.1 (ver figura 3.1). El respaldo (R) cuyo papel es consolidar G reafirma la confusión entre fem y diferencia de potencial. Además, supone que el proceso de separación de carga que es una característica de la pila se presenta en las resistencias del circuito. En el argumento esgrimido por el estudiante no menciona un calificativo o matizador (M) y tampoco se hace mención de condiciones de refutación (E).

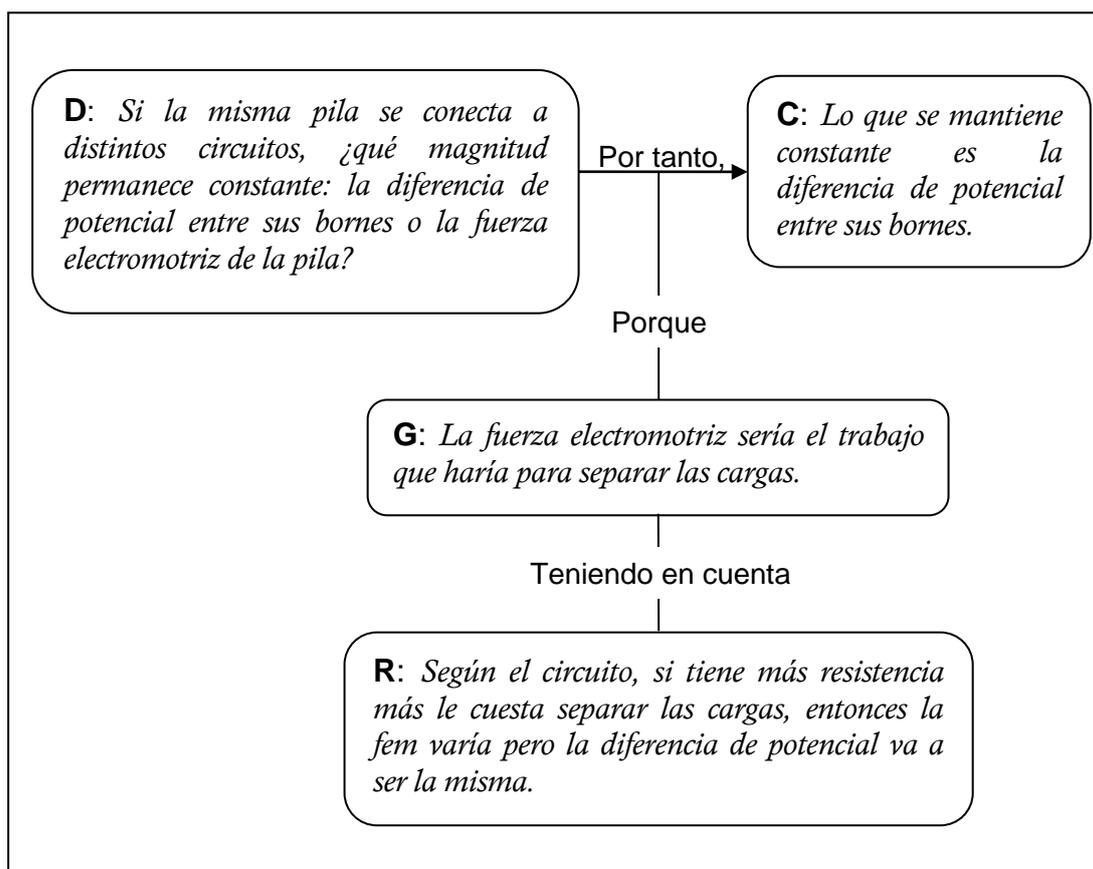


Figura 3.3 Modelo de argumento de Toulmin de E1-R1.4

A propósito de la calidad epistemológica del argumento, la justificación G de C no explica por qué se mantiene constante la diferencia de potencial en términos del significado de este, más bien deja implícito tal significado y posiblemente supone que es suficiente justificación enunciar lo que entiende por fem. Así, hay insuficiencia en la información que justifica C.

Como se puede apreciar en la presentación de la primera entrevista, los estudiantes expresan diferentes concepciones de fem según la situación planteada. Por ejemplo, el estudiante E1 al responder la pregunta 1.1 es

coherente con la definición aceptada en la teoría electromagnética, pero su respuesta a la pregunta 1.4 no es coherente e incluso el grado de confusión que se aprecia es bastante grande. Al parecer quienes caen en estas contradicciones (la mayoría) no las ven. Además, parece que no ven la necesidad de estructurar un concepto general de fem, sino más bien lo elaboran según el contexto específico.

Un patrón global de las justificaciones sugiere que aunque los estudiantes entienden la importancia de vincular la evidencia y las afirmaciones, ellos tienden a confiar en una única parte de los datos cuando apoyan una afirmación particular. Como consecuencia, los estudiantes con frecuencia no incluyen una comparación de datos desde múltiples fuentes cuando justifican una afirmación en casos donde tales comparaciones son necesarias. Por ejemplo, el concepto de fem se presenta en diversas situaciones, tanto electrocinéticas como electromagnéticas, pero los estudiantes al elaborar argumentos para contestar las preguntas propuestas se limitaban a considerar las situaciones planteadas, en este caso circunscritas al campo de la electrocinética.

### **3.2.2 Análisis de la segunda entrevista**

La segunda entrevista está basada en las dos preguntas que aparecen en el cuadro 2.4. Fue llevada a cabo con ocho estudiantes de Ingeniería de la Universidad del País Vasco (EHU). Todos los estudiantes eran buenos o sobresalientes por su rendimiento académico y acababan de superar la asignatura de física de primer curso de Ingeniería. Para la entrevista se organizaron cuatro grupos de dos estudiantes cada uno. En los ejemplos que se citan cada estudiante se indica con una E seguida de un número que varía entre 1 y 8 (corresponde el número de estudiantes entrevistados), la letra V inicial de Vasco, R inicial de respuesta I o II (E#V-RI).

Después de analizar el audio y la transcripción de las entrevistas, las concepciones, en términos de sus significados globales, que se aprecian son dos y algunos de los ejemplos que las ilustran son:

- *Fem como una fuerza que hace trabajo, como trabajo o como energía:*

E1V-RI: *“La fem es el trabajo que se hace para mover los electrones, para que se genere otro campo en contra del campo”*

E3V-RI: *“La fem es la fuerza que mueve las cargas a raíz de un cambio de flujo... es la fuerza la que hace el trabajo, como en el condensador. Para mover las cargas hay que hacer trabajo.”*

E5V-RI: *“... fem es la fuerza que genera la corriente”*

- *Confusión entre fem y diferencia de potencial:*

E4V-RII: *“La fem actúa como la diferencia de potencial y la diferencia de potencial actúa como si fuera energía”*

E6V-RII: *“La fem que se genera en el circuito sería igual a la diferencia de potencial. En realidad no quieren decir lo mismo pero tienen el mismo valor.”*

Como se puede apreciar en estos ejemplos, al igual que en la primera entrevista con estudiantes colombianos, los estudiantes de la EHU expresan diferentes significados del concepto de fem, dependiendo del contexto en el que lo tengan que aplicar. Esto muestra que hay interacción entre las preguntas formuladas y las concepciones expresadas.

En general, se hace evidente que se confirman las categorías establecidas en la tabla 3.1 y por lo tanto el aspecto estructural (en qué se enfocan) de cada una de estas concepciones (ver apartado 3.1.1).

A continuación se considera el modelo de argumento de Toulmin para analizar algunos de los argumentos de los estudiantes, enunciados para justificar sus concepciones particulares. Asimismo, se juzga la calidad del argumento teniendo en consideración la capacidad conceptual y la calidad epistemológica (ver apartado 2.3.3).

En la figura 3.4 se presenta el argumento de E1V-RI haciendo uso del MAT, enunciado para dar su interpretación de la situación planteada en la pregunta I (cuadro 2.4). Y que hemos clasificado en la categoría B<sub>1</sub> de la tabla 3.1.

De acuerdo a la estructura del MAT, D que es la base de la afirmación que se presenta en C corresponde a la situación planteada por la pregunta I. La

conclusión (C) es una afirmación incorrecta porque supone que el concepto de fem es equivalente al concepto de trabajo, es decir no tiene presente que en ciencias un criterio de elaboración de teorías es el de 'economía conceptual'. Además, si bien es cierto que el trabajo está relacionado con la fem, esto no implica que trabajo y trabajo por unidad de carga sean expresiones equivalentes.

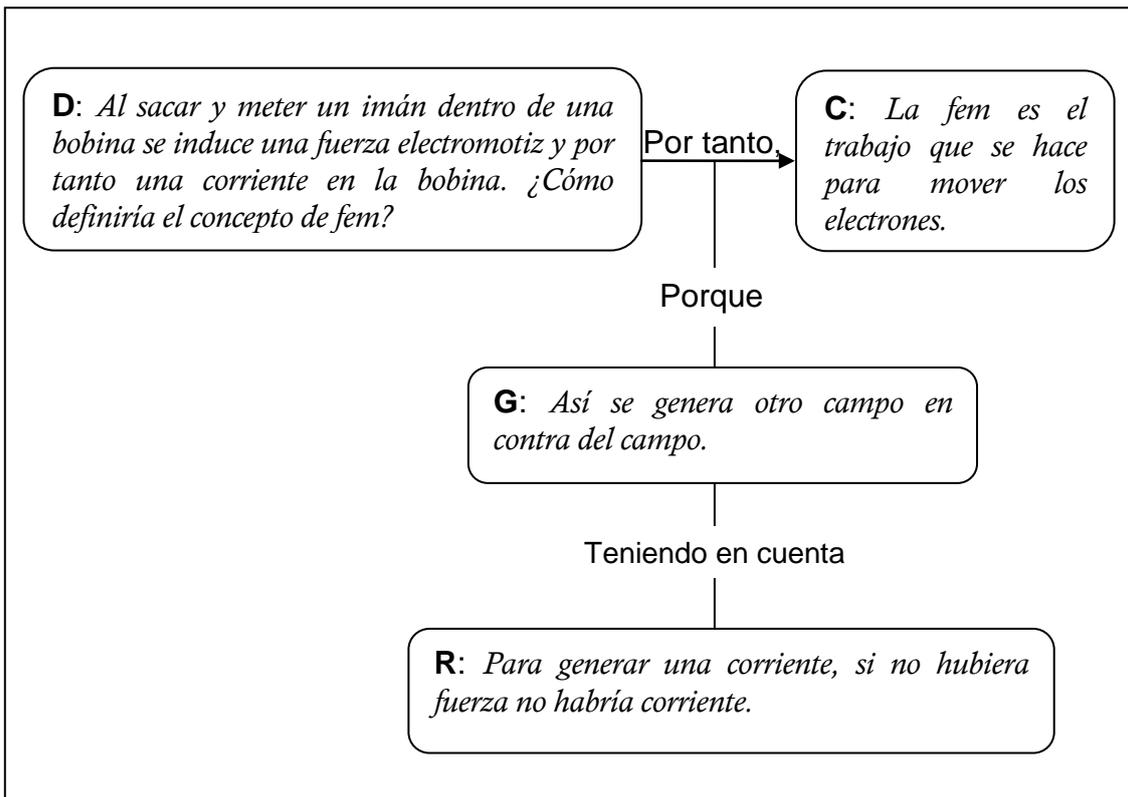


Figura 3.4 Modelo de argumento de Toulmin de E1V-RI

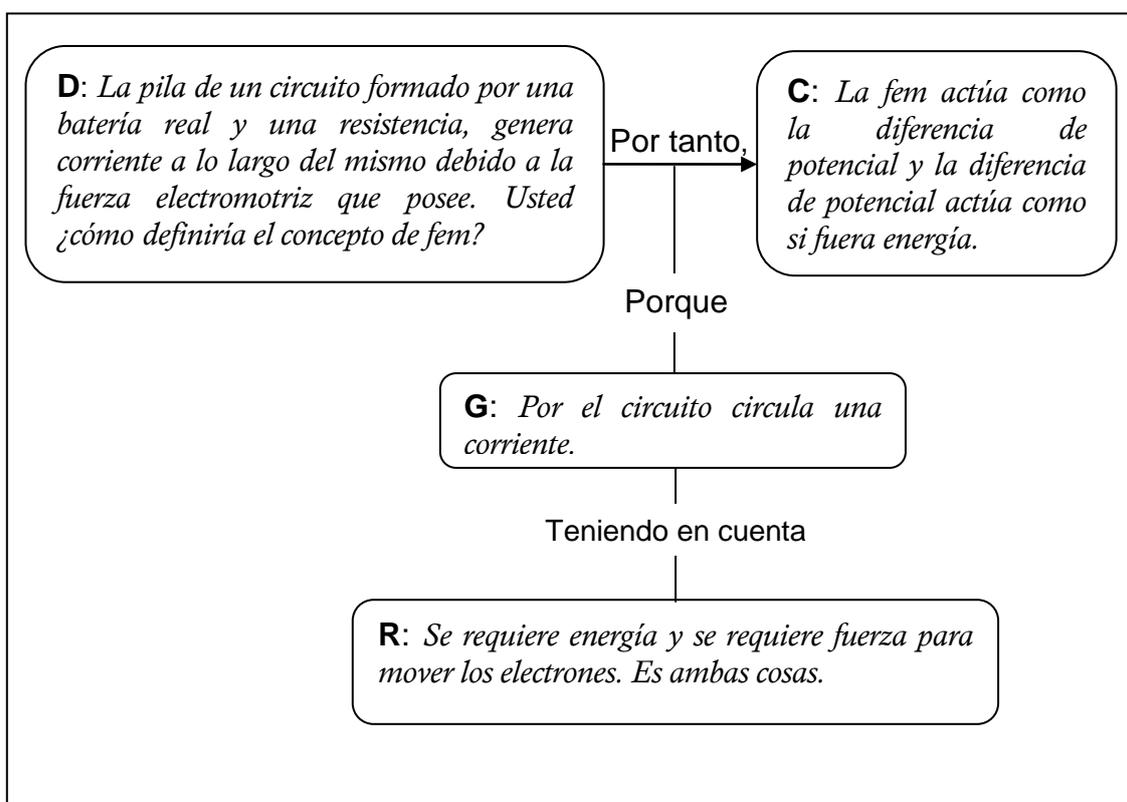
La proposición G, que indica cómo a partir de D se pasa a C, revela que el estudiante, al parecer, supone que la fem es una manera de generar campo eléctrico inducido –que según él- se opone al campo magnético variable. Es decir, esto pone de manifiesto una comprensión incorrecta de la explicación del fenómeno de inducción electromagnética.

Por otro lado, el respaldo (R) cuyo papel es consolidar G en este caso no cumple esa función, más bien parece una proposición que también garantiza la afirmación ofrecida en C, pero es contradictoria porque en C afirma que la fem es trabajo y en R que la fem es fuerza. Por último, en el argumento esgrimido

por el estudiante no se menciona un calificativo o matizador (M) y tampoco se hace mención de condiciones de refutación (E).

A propósito de la calidad epistemológica del argumento, es evidente que en G y R hay insuficiencia en la información ofrecida para justificar la conclusión C.

En la figura 3.5 se presenta el argumento de E4V-RII haciendo uso del MAT, enunciado para dar su interpretación de la situación planteada en la pregunta II (cuadro 2.4). Y que hemos clasificado en la categoría B<sub>2</sub> de la tabla 3.1.



**Figura 3.5 Modelo de argumento de Toulmin de E4V-RII**

De acuerdo a la estructura del MAT, D que es la base de la afirmación que se presenta en C corresponde a la situación planteada por la pregunta II. La conclusión (C) es una afirmación incorrecta porque supone que el concepto de fem es equivalente al concepto de diferencia de potencial, y a su vez estos dos conceptos son equivalentes al concepto de energía.

La proposición G, que indica cómo a partir de D se pasa a C, revela que el estudiante, al parecer, hace la siguiente inferencia: si se tiene una corriente en un circuito es porque se tiene una diferencia de potencial que es también es

una fem. El respaldo (R) cuyo papel es consolidar G reafirma que fem, diferencia de potencial y energía son equivalentes, y -estos conceptos- también son equivalentes a fuerza. Por último, en el argumento del estudiante no se menciona un calificativo o matizador (M) y tampoco se hace mención de condiciones de refutación (E).

A propósito de la calidad epistemológica del argumento, es evidente que en G y R hay insuficiencia en la información ofrecida para justificar la conclusión C.

Después de haber analizado las entrevistas, se presenta a continuación el análisis de los libros de texto.

### 3.3 Análisis de los Libros de Texto

En los cursos de física los libros de texto usualmente es la primera fuente para los estudiantes aprender nuevos conceptos. Los libros de texto simplifican el trabajo de los profesores orientándolos en las decisiones acerca de cómo enseñar un tema, como por ejemplo el concepto de fem. Los libros de texto también orientan acerca de qué enseñar y qué se considera exacto, completo y coherente (ver apartado 2.3.4). Sin embargo, los libros de texto pueden conllevar riesgos si su contenido no tiene en cuenta los avances de la investigación en Enseñanza de la Física. En este sentido, se hizo el análisis de 16 libros de texto para el nivel universitario siguiendo el protocolo de análisis presentado en el apartado 2.4.3. La relación completa de los libros analizados se encuentra como anexo a la bibliografía de este trabajo.

El protocolo de análisis consta de 13 cuestiones que se dividen en 4 apartados (a, b, c y d). En la tabla 3.7 se presentan los resultados, en términos de porcentajes (el número de libros entre paréntesis), obtenidos para cada una de las cuestiones que se han analizado. La columna titulada **Si** significa que se contempla el criterio de forma satisfactoria con un comentario explicativo suficiente o colocando una cuestión-tarea o bien explicando el criterio mediante un ejemplo. La columna titulada **Menciona** implica que hay algún comentario sobre el criterio pero no se detienen a explicarlo o a proponer una cuestión-

tarea ni propone un ejemplo. La columna **No** significa que no se contempla el criterio.

**Tabla 3.7 Resultados de la aplicación del protocolo de análisis para los 16 libros de texto**

<b>Criterio de Análisis</b>	<b>SI</b>	<b>Menciona</b>	<b>NO</b>
a.1 Se propone alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para explicar la noción de fem en relación con la acción de campos eléctricos no conservativos.	31.3% (5)	12.5% (2)	56.2% (9)
a.2 Se propone alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para enfatizar la diferencia entre acciones de campos eléctricos conservativos y no conservativos, tanto en el contexto de circuitos eléctricos DC como en el estudio del fenómeno de inducción electromagnética. En particular se explicita la diferencia epistemológica entre el concepto de fem y de diferencia de potencial.	31.3% (5)	12.5% (2)	56.2% (9)
a.3 Se propone alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo para explicar que existe una sola manera de definir el concepto de fem, pero existen varias formas de calcularla y medirla, dependiendo del contexto en el que se calcula. En consecuencia, hacer notar que la fem inducida o la fem de una batería son diversas formas de generar una fem.	37.5% (6)	25% (4)	37.5% (6)
b.1 Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica cómo se mide experimentalmente la fem de una pila a través de la medida del voltímetro de una pila en circuito abierto (perspectiva macroscópica).	0%	31.3% (5)	68.7% (11)
b.2 Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explicita que la medida del voltímetro representa el trabajo por unidad de carga realizado por la pila para suministrar energía a todo el circuito y mover los electrones (perspectiva microscópica).	6,3% (1)	12.5% (2)	81,2% (13)
b.3 Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que enfatiza que el valor de la fem incluido en la ley de las mallas de Kirchhoff es una componente necesaria para aplicar el principio de conservación de la energía a los circuitos eléctricos (perspectiva macroscópica).	37.5% (6)	0%	62.5% (10)
b.4 Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica que la medida del voltímetro en un circuito RL (ubicado en el inductor) coincide con la fem inducida (perspectiva	0%	0%	100% (16)

macroscópica).			
b.5 Se presenta alguna tarea, un ejemplo o comentario declarativo que explica que la medida del voltímetro representa la energía por unidad de carga suministrada por el campo eléctrico inducida no conservativo para mover los electrones en el caso que se tenga un circuito (perspectiva microscópica).	12.5% (2)	0%	87.5% (14)
c.1 Se proponen actividades que involucran la elaboración de una hipótesis.	18.7% (3)	6,3% (1)	75% (12)
c.2 Se proponen actividades que involucran el análisis de variables.	25% (4)	6,3% (1)	68.7% (11)
c.3 Se proponen actividades en las que las explicaciones o modelos tienen que ser justificados, tanto en el marco de los circuitos DC como en el estudio de la inducción electromagnética.	25% (4)	6,3% (1)	68.7% (11)
d.1 En la introducción del concepto de fem se hace algún comentario declarativo o se propone alguna tarea que relaciona este concepto con otros capítulos y/o su importancia para el análisis energético de los fenómenos electromagnéticos.	37.5% (6)	12.5% (2)	50% (8)
d.2 Se proponen por lo menos tres tareas o ejemplos que explican la utilidad del estudio del concepto de fem en relación a la vida cotidiana, la tecnología o la ciencia.	18.7% (3)	31.3% (5)	50% (8)

A continuación se presentan los criterios de análisis organizados en seis grupos y se ilustra con ejemplos de los libros revisados los resultados de la tabla 3.7.

- ***¿Se explica la noción de fem en relación con la acción de campos eléctricos no conservativos? ¿Se enfatiza la diferencia entre acciones de campos eléctricos conservativos y no conservativos, tanto en el contexto de circuitos eléctricos DC como en el estudio del fenómeno de inducción electromagnética. En particular se explicita la diferencia epistemológica entre el concepto de fem y de diferencia de potencial? (Criterios a.1 y a.2)***

Como se puede ver en la tabla 3.7 los resultados de los criterios a.1 y a.2 casualmente coinciden. Un 31,3% de los libros de texto analizados **Si**

enuncian algún comentario explicativo suficiente o colocan una cuestión-tarea o bien explican el criterio mediante un ejemplo. Estos libros son: Chabay y Sherwood (2011), Guerra et al. (1985), Ohanian y Markert (2007), Tipler y Mosca (2008) y Young y Freedman (2004). Veamos algunos ejemplos:

### **Chabay y Sherwood (2011)**

Antes de definir fem en el contexto de circuitos, diferencia entre fuerza y campo coulombianos de fuerza de fuerza y campo no coulombianos:

*“Las fuerzas coulombianas y no coulombianas se oponen dentro de una batería” (Chabay y Sherwood 2011, p. 768).*

En el contexto de la ley de Faraday dicen:

*“La fem es la energía de entrada (no colombiano) por unidad de carga. La fuerza (no colombiano) por unidad de carga es el campo  $\vec{E}_{NC}$  (no colombiano)” (Chabay y Sherwood 2011, p. 950).*

Explicita la diferencia entre los conceptos de fem y diferencia de potencial:

*“Es importante mantener en mente que aunque las unidades de la fem son voltios, la fem no es una diferencia de potencial. La diferencia de potencial es una integral de línea del campo eléctrico generado por cargas reales. La fem es la energía de entrada por unidad de carga y puede en principio ser de naturaleza gravitacional o nuclear.” (Chabay y Sherwood 2011, p. 769).*

### **Tipler y Mosca (2008)**

Define fuente de fem y el concepto de fem así:

*“Una fuente de fem hace trabajo no conservativo sobre la carga que pasa a través de ella, aumentando o disminuyendo la energía potencial eléctrica de la carga... El trabajo por unidad de carga es llamado la fem  $\mathcal{E}$  de la fuente.” (Tipler y Mosca 2008, p.850).*

Explicita la diferencia entre fem y diferencia de potencial:

*“La diferencia de potencial entre los terminales de una batería ideal es igual en magnitud a la fem de la batería.” (Tipler y Mosca 2008, p.851)*

### **Guerra et al. (1985)**

Define fem desde el primer momento que lo menciona en función de un campo no conservativo que llama campo electromotor. Considerando el

movimiento uniforme de una barra cargada en un campo magnético enuncia:

*“Llamaremos “fuerza electromotriz” al valor de la circulación del campo electromotor  $\vec{E}$  calculada a lo largo del trayecto de  $A_2$  a  $A_1$ , de modo que dicho valor sea positivo, y lo indicaremos por  $\mathcal{E}$ .  
... los extremos  $A_2$  a  $A_1$  se llaman bornes...” (Guerra et al. 1985, p. 281).*

Más adelante comenta:

*“En cada caso será necesario determinar el correspondiente campo electromotor, el cual se originará por medios muy diversos (mecánicos, químicos, nucleares, termoeléctricos, ...) y posteriormente, hallar su circulación entre los bornes del generador.” (Guerra et al. 1985, p. 282).*

Dos libros de texto, es decir el 12,5%, **menciona** que hay algún comentario sobre el criterio pero no se detienen a explicarlo o a proponer una cuestión-tarea ni propone un ejemplo. Estos libros son: Halliday et al. (2002) y Lea y Burke (2001). Algunos ejemplos:

### **Lea y Burke (2001)**

Inicialmente, en el capítulo 26, donde aborda una introducción a los circuitos eléctricos, define fem como:

*“La fuerza electromotriz (fem)  $\mathcal{E}$  de una batería u otra fuente de energía eléctrica es el valor de la diferencia de potencial que mantiene entre sus terminales o bornes en ausencia de corriente.” (Lea y Burke 2001, p. 847).*

Esta definición tiene dos inconvenientes: (i) No siempre el valor de la fem de una fuente de energía eléctrica es igual al valor de la diferencia de potencial entre sus bornes en ausencia de corriente, porque se tienen casos en los que hay fem pero no hay diferencia de potencial, y en otros casos hay fem mientras circula corriente. (ii) No se puede definir una magnitud, en este caso la fem, como el valor de otra magnitud. Aunque sea correcto que los valores de dos magnitudes coincidan en ciertas situaciones, no es un caso general sino particular.

Posteriormente en el capítulo 30, en el que aborda campos dinámicos, después de definir campo eléctrico inducido afirma:

“Alrededor de un circuito  $C$  fijo, la fem se puede expresar en función del campo eléctrico inducido:  $\mathcal{E} = \oint_C \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l}$ ” (Lea y Burke 2001, p. 961).

Indica que el campo eléctrico es inducido, pero no dice que esta es la definición general de fem sino que es una forma de expresar la fem. Además, como lo presenta en el contexto de la inducción electromagnética, el lector puede llegar a suponer que esta forma de expresar la fem no es aplicable en el contexto de los circuitos DC.

A propósito de la diferencia entre los conceptos de fem y diferencia de potencial, después de estudiar circuitos DC y el fenómeno de inducción electromagnética aborda la naturaleza de la fem, en un ítem específico.

Afirma:

*“Debemos distinguir cuidadosamente los papeles que juegan la diferencia de potencial y el suministro de energía.*

*La figura 30.15 muestra tres circuitos, cada uno con la misma fem, resistencia y corriente. Sus diferencias estriban en la naturaleza de la fem y en el papel que juegan los campos estáticos.*

*El circuito (a) es de corriente continua... La batería suministra energía que se usa en un lugar distinto – en el resistor. El potencial eléctrico es el sistema de compatibilidad que describe dónde se suministra la energía y dónde se usa. El potencial sube a través de la batería y disminuye nuevamente a través del resistor.*

*El circuito (b)... En este caso la fuente de energía es el agente externo que tira de la varilla. La fem de movimiento que produce la fuerza magnética sobre los electrones en la varilla hace que esté disponible la energía para el circuito. Esta energía se disipa en forma de calor por la resistencia en la varilla. En el resto del circuito no se requiere energía y no se necesitan campos para impulsar la corriente. En consecuencia, no hay campo eléctrico o diferencia de potencial.*

*En el circuito (c), la fuente de energía y la fem son iguales que en el circuito (b), pero aquí la resistencia de la varilla es despreciable y los rieles están conectados mediante un resistor estacionario. Como en el circuito (a), la energía se usa en el resistor, a cierta distancia de la fuente... El campo eléctrico  $\vec{E}_C$  producido por la distribución de carga crea una diferencia de potencial entre BC y AD...” (Lea y Burke 2001, p. 966-967).*

Contrario a lo que se afirma en el texto, consideramos que el circuito (b) y (c) son equivalentes, es decir, se genera una diferencia de potencial en los extremos de la barra móvil en (b). Esto implica que los autores no presentan una situación en la que se tiene fem pero no hay diferencia de potencial.

Aunque abordan la distinción entre fem y diferencia de potencial, su disertación no es suficientemente explícita.

### Halliday et al. (2002)

En el capítulo que aborda circuitos de corriente continua (Halliday et al. 2002, p.137), define el concepto de fem como “*trabajo por unidad de carga*  $\mathcal{E} = dW/dq$ ”. Posteriormente, en el capítulo que aborda la ley de inducción de Faraday, enuncia que:

*“la fem inducida en un circuito está dada por la ley de inducción de Faraday... es igual al negativo de la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético a través del circuito...  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ ” (Halliday et al. 2002, p. 213).*

En el párrafo siguiente afirma:

*“Si la bobina consta de  $N$  vueltas, entonces aparece una fem inducida en cada vuelta, y la fem inducida total en el circuito es la suma de los valores individuales, del mismo modo que en el caso de las baterías conectadas en serie.”*

La frase “fem inducida en cada vuelta” no se puede comprender fácilmente sin haber presentado la noción de fem en relación con un campo eléctrico no conservativo.

Más adelante presenta la definición de campos eléctricos inducidos (Halliday et al. 2002, p.218), caracterizados por ser campos no conservativos en contraste con los campos electrostáticos que son conservativos. Y deduce a partir de la definición de fem como trabajo por unidad de carga, que  $\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}$ , donde  $\vec{E}$  es un campo no conservativo. Anota que la línea cerrada de integración puede ser matemática o física (un conductor).

El procedimiento seguido para relacionar la fem con un campo eléctrico no conservativo, no hace precisión si esa relación es una definición de fem y menos que es la definición general. De otro parte, en el contexto de los circuitos eléctricos DC en ningún momento se menciona la relación entre fem y campo eléctrico no conservativo.

Por otro lado, pareciera que diferencia los conceptos de fem y diferencia de potencial, en afirmaciones como:

*“La suma algebraica de los cambios en el potencial encontrado en un recorrido completo de cualquier circuito cerrado es cero” (Halliday et al. 2002, p. 139).*

Pero falta claridad porque, por ejemplo, al aplicarla a un circuito que contiene una batería y una resistencia dice:

*“Según recorremos la batería de abajo arriba, existe un incremento de potencial igual a  $+\mathcal{E}$  porque la batería realiza un trabajo (positivo) sobre los portadores de carga” (Halliday et al. 2002, p. 139).*

Previamente no ha expresado que los valores de la fem y la diferencia de potencial de la batería coinciden cuando se tiene una batería ideal. Así, tal afirmación implica que la fem y la diferencia de potencial son conceptos iguales o por lo menos en algunos casos. Además, tampoco se llega a mencionar en ningún capítulo la diferencia entre estos dos conceptos en términos de los campos eléctricos conservativos y no conservativos.

El 56,2% de los libros de texto **no** enuncian ningún comentario o cuestión-tarea relacionados con estos dos criterios. Estos libros son: Alonso y Finn, (1995), Bauer y Westfall (2011), Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Giancoli (2008), Hewitt y Wolf (2008), Knight (2008), Moore (2003), Serway y Jewett (2010) y Wilson y Buffa (2003). Veamos algunos ejemplos:

### **Moore (2003)**

Define fem de una batería como:

*“ $\mathcal{E}$  es la energía por unidad de carga total o fem transferida a cada electrón por cualquier mecanismo que conduzca carga a través de la batería (reacciones químicas en este caso)... De modo que es deseable que usted imagine que fem es simplemente una nueva palabra que expresa la potencia de una batería en términos de la energía característica por unidad de carga entregada por las reacciones químicas de una batería” (Moore 2003, p. 311).*

Al abordar el fenómeno de inducción electromagnética presenta:

*“La ley de Faraday  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} + \frac{1}{c} \frac{d\Phi_B}{dt} = 0$  ... Observe que  $\vec{E} \cdot d\vec{s} = \vec{F}_e/q \cdot d\vec{s}$  es el K-trabajo entregado por unidad de carga por el campo eléctrico a un portador de carga que se mueve desde un extremo de un diferencial de longitud de lazo  $d\vec{s}$  hasta el otro. La suma de esto para todos los diferenciales de longitud en el lazo es la energía total por unidad de carga, esto es: la fem  $\mathcal{E}_{\text{lazo}}$  transferida a un portador de carga por el campo electromagnético conforme aquél viaja una vez alrededor del lazo. En particular, si ocurre que el lazo en cuestión corresponde a un lazo conductor, esta ecuación implica que un flujo magnético cambiante a través del lazo conducirá una*

corriente alrededor de él exactamente como si estuviese conectado a una batería con fem" (Moore 2003, p. 522).

Más adelante, en la misma página, afirma:

*"La fem está definida de modo que  $\mathcal{E}_{\text{lazo}} \equiv \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}$  en el marco del lazo conductor, donde  $\vec{E}$  es el campo eléctrico evaluado en un diferencial de longitud de lazo representado por  $d\vec{S}$ . Un valor positivo de  $\mathcal{E}_{\text{lazo}}$  significa por tanto que una corriente convencional fluirá en la dirección indicada por los vectores diferencial de longitud."* (Moore 2003, p. 522).

Como se puede apreciar, no hace ninguna mención explícita acerca de la naturaleza del campo eléctrico que está involucrado en la definición de fem. Además, la forma de usar la palabra lazo en relación a la fem, hace suponer que sólo si se tiene un lazo conductor se puede tener una fem. Esto mismo ocurre al definir fem como energía por unidad de carga. No considera el caso en que no hay conductor a pesar de que haya inducción. Tampoco relaciona la definición de fem en función del campo eléctrico con el caso de una batería. A este respecto afirma:

*"la fem describe la energía por unidad de carga aportada por algo distinto a un campo eléctrico, como puede ser una reacción química"* (Moore 2003, p. 311).

Es decir, niega alguna relación entre el concepto de fem y el campo eléctrico, al definir fem de una batería. Pero, al definir fem en el caso de la inducción electromagnética esta queda en función de un campo eléctrico. Lo cual constituye una contradicción.

En resumen, no enfatiza la diferencia entre acciones de campos eléctricos conservativos y no conservativos, tanto en el contexto de circuitos eléctricos DC como en el estudio del fenómeno de inducción electromagnética.

Por otro lado, aunque indica que la fem y la diferencia de potencial son conceptos diferentes:

*"Advierta que mientras la fem y el potencial tienen las mismas unidades SI (volts), son conceptualmente distintas. El potencial  $\phi$  se refiere de manera específica a la energía potencial electrostática por unidad de carga, mientras la fem  $\mathcal{E}$  se refiere a otros tipos de energía por unidad de carga."* (Moore 2003, p. 305).

En la página 311 afirma:

*“Una diferencia de potencial describe de manera específica un cambio en la energía potencial electrostática por unidad de carga, mientras que la fem describe la energía por unidad de carga aportada por algo distinto a un campo eléctrico, como puede ser una reacción química”*

En la página 313, afirma:

*“... la diferencia de potencial  $|\Delta\phi|$  entre los electrodos de una batería es igual a la fem química de la batería sólo cuando no fluye corriente a través de ella...”*

Al no precisar de manera explícita que en este caso igual significa valores iguales más no conceptos iguales, queda latente una posible ambigüedad en la comprensión de estos dos conceptos.

### **Wilson y Buffa (2003)**

Define fem como:

*“La diferencia de potencial entre las terminales de una batería cuando no está conectada a un circuito se llama fuerza electromotriz (fem) ( $\mathcal{E}$ ) de la batería.” (Wilson y Buffa 2003, p. 578).*

### **Alonso y Finn, (1995)**

Relaciona el concepto de fem con un campo eléctrico estático:

*“Examinaremos sólo campos estáticos, o sea independientes del tiempo.  
... Como la intensidad del campo eléctrico es igual a la fuerza por unidad de carga, el trabajo realizado por el campo eléctrico cuando desplazamos una carga unitaria a lo largo de la trayectoria  $L$  está expresado por la integral de línea...  $fem = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$ ...”  
(Alonso y Finn, 1995, p. 560)*

- ***¿Se explica que existe una sola manera de definir el concepto de fem, pero existen varias formas de calcularla y medirla? ¿Hace notar que la fem inducida o la fem de una batería son diversas formas de generar una fem? (Criterio a.3)***

Como se puede ver en la tabla 3.7 los libros de texto que **Si** enuncian algún comentario explicativo suficiente o colocan una cuestión-tarea o bien explican el criterio mediante un ejemplo es el 37,5%. Estos libros son: Alonso y Finn, (1995), Chabay y Sherwood (2011), Knight (2008), Ohanian

y Markert (2007), Tipler y Mosca (2008) y Young y Freedman (2004).  
Veamos algunos ejemplos:

### **Chabay y Sherwood (2011)**

Presenta la fem de movimiento como una forma de generar fem:

*“Un campo magnético ejerce una fuerza sobre un alambre que transporta una corriente. Este efecto se puede invertir: mover un alambre a través de un campo magnético genera una corriente en el alambre, lo que proporciona un modo de generar electricidad a partir de trabajo mecánico” (Chabay y Sherwood 2011, p. 850).*

Una fem generada en una barra metálica moviéndose en un campo magnético constante:

*“El trabajo no coulombiano por unidad de carga es  $\frac{evBL}{e} = vBL$ . Si la resistencia de la barra es despreciable,  $\Delta V = \text{fem} = vBL$ . Si la barra tiene alguna resistencia  $r_{\text{int}}$  esta resistencia es como la resistencia interna de algún otro tipo de batería, y  $\Delta V = \text{fem} - r_{\text{int}}I$ . La fem que es creada por mover alambre en un campo magnético es llamada “fem de movimiento” (Chabay y Sherwood 2011, p. 851).*

### **Knight (2008)**

Presenta una analogía entre una batería y un conductor que se mueve a través de un campo magnético uniforme, para hacer notar que existen diversas formas de generar una fem:

*“... el movimiento del alambre a través de un campo magnético induce una diferencia de potencial... entre los extremos del conductor. Hay una analogía importante entre esta diferencia de potencial y la diferencia de potencial de una batería... Podemos referirnos a una batería, donde las cargas son separadas por reacciones químicas, como una fuente de fem química. ... Usted puede pensar el movimiento de un conductor como una ‘batería’ que permanece cargada sólo siempre que se mantenga en movimiento... La fem del conductor es debida a su movimiento, en lugar de deberse a reacciones químicas internas.” (Knight 2008, p. 1044).*

### **Tipler y Mosca (2008)**

Nota que una forma de generar fem es a través del fenómeno de inducción electromagnética:

*“Las fems... causadas por tal cambio de flujo magnético son llamadas fems inducidas... Una fem causada por el movimiento de un conductor en una región con campo magnético es llamada una fem de movimiento.” (Tipler y Mosca 2008, p.959)*

### Alonso y Finn, (1995)

Explicita que existen diversas formas de generar fem:

*“Existen muchas formas de generar una fuerza electromotriz. Un método común es mediante una reacción química, como en una celda o batería, donde la energía interna liberada en la reacción química es transferida a los electrones. Otro método importante es mediante el fenómeno de la inducción electromagnética...” (Alonso y Finn, 1995, p. 537).*

### Guerra et al. (1985)

Relaciona la definición de fem con otra expresión menos general pero que suele emplearse:

*“Si llamamos  $W$  al trabajo que realiza el campo electromotor para trasladar una carga genérica  $q$  del borne negativo al borne positivo, se interpreta la fuerza electromotriz así:  $\mathcal{E} = \frac{W}{q}$ .*

*De este modo, la fuerza electromotriz adquiere el significado de una “densidad de energía por carga” que es necesario atribuir a cada carga movilizada para lograr su redistribución en los bornes del generador” (Guerra et al. 1985, p.283).*

Además hace explícitas diversas formas de generar una fem:

*“En el ejemplo de la barra móvil, el mecanismo de generación de la fuerza electromotriz es estrictamente electromagnético y el campo electromotor... puede interpretarse como un campo eléctrico.*

*En un generador de Van der Graaff las cargas se generan por fricción y son transportadas mecánicamente... En este caso el campo electromotor tiene origen mecánico...*

*En otros casos, el procedimiento de obtención de la fuerza electromotriz se fundamenta en un proceso electroquímico. Este es el caso de las llamadas ‘pilas’” (Guerra et al. 1985, p.287).*

Y, en el análisis de la ley de Faraday afirma:

*“La corriente inducida en la espira puede atribuirse, en todos los casos examinados, a la existencia de un generador ficticio de fuerza electromotriz  $\mathcal{E}(t)$ ...” (Guerra et al. 1985, p.328).*

Cuatro libros de texto, es decir el 25%, **menciona** que hay algún comentario sobre el criterio pero no se detienen a explicarlo o a proponer una cuestión-tarea ni proponen un ejemplo. Estos libros son: Bauer y Westfall (2011), Giancoli (2008), Guerra et al. (1985) y Lea y Burke (2001).

Algunos ejemplos:

### **Lea y Burke (2001)**

Aunque hace notar que existen varias formas de generar fem, no indica que existe una sola manera de definirlo (ver punto anterior) y varias formas de calcularlo.

*“La fem de una batería ideal es la energía que suministra al circuito, por unidad de carga que pasa por él, y también es igual a la diferencia de potencial que mantiene la batería entre sus bornes. La fem inducida es otro tipo de fuente de energía en los circuitos, pero su relación con la diferencia de potencial no es tan sencilla.” (Lea y Burke 2001, p. 966).*

### **Giancoli (2008)**

Hace notar que la fem inducida es una forma de generar fem:

*“Cuando el campo magnético a través de una bobina Y cambia, se presenta una corriente en Y como si hubiese una fuente de fem en el circuito Y. Nosotros por lo tanto decimos que ‘un cambio de campo magnético induce una fem’. (Giancoli 2008, p. 585).*

El 37,5% de los libros de texto **no** enuncian ningún comentario o cuestión-tarea relacionados con este criterio. Estos libros son: Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Hewitt y Wolf (2008), Halliday et al. (2002), Moore (2003), Serway y Jewett (2010) y Wilson y Buffa (2003). Veamos algunos ejemplos:

### **Moore (2003)**

En el capítulo 5, p. 311, define fem de una batería como “energía por unidad de carga” y en el capítulo 14, p. 522, define fem como “ $\mathcal{E}_{Lazo} \equiv \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}$ ”. Aunque menciona que la primera definición se puede derivar de la segunda, no dice que esta última es la definición general ya que incluye el vacío y la no presencia de cargas. Por otro lado, en el capítulo 11, p. 462, afirma “ $\oint \vec{E} \cdot d\vec{S}$  se aplica solamente a campos eléctricos estáticos”. Esta afirmación es un error conceptual.

- ***¿Se explica cómo se mide experimentalmente la fem de una pila a través de la medida del voltímetro de una pila en circuito abierto? ¿Se explicita que la medida del voltímetro representa el trabajo por unidad de carga realizado por la pila para suministrar energía a todo el***

**circuito y mover los electrones? ¿Se explica que la medida del voltímetro representa la energía por unidad de carga suministrada por el campo eléctrico inducida no conservativo para mover los electrones en el caso que se tenga un circuito? (Criterios b.1, b.2 y b.5)**

Como se puede ver en la tabla 3.7 los libros de texto analizados que **Si** enuncian algún comentario explicativo suficiente o colocan una cuestión-tarea o bien explican los criterios b.1, b.2 y b.5 mediante un ejemplo son: En el caso de b.1 ningún libro (0%); para el criterio b.2 sólo el 6.3%, es decir un libro, que es Guerra et al. (1985); y en el caso de b.5 es el 12,5% que corresponde a dos libros: Chabay y Sherwood (2011) y Guerra et al. (1985). El siguiente ejemplo corresponde al criterio b.5:

### **Chabay y Sherwood (2011)**

En el capítulo que aborda la ley de Faraday, analiza la lectura de un voltímetro cuando sus cables de conexión se conectan, en un caso rodeando una región en la que varía el campo magnético, y en otro caso sin rodear una región como la anterior. Veamos:

“¿Es cero la lectura de estos voltímetros?”

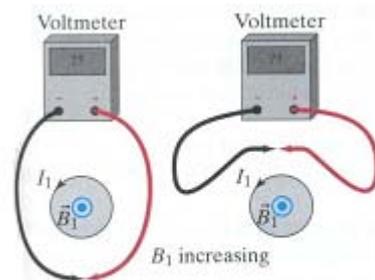


Figure 23.17 What do these voltmeters read?

Los cables del voltímetro del lado izquierdo de la figura 23.17 encierran una región de campo magnético variable, así el voltímetro leerá una fem igual a  $d\Phi_{mag}/dt$ . Los cables del otro voltímetro no encierran una región de campo magnético variable, así el voltímetro lee cero.” (Chabay y Sherwood 2011, p. 955).

El siguiente ejemplo corresponde a los tres criterios, es decir, b.1, b.2 y b.5:

### Guerra et al. (1985)

Menciona que existen procedimientos para medir fem y diferencia de potencial, aunque no los describe:

*“Supongamos que disponemos de un procedimiento para medir la diferencia de potencial ( $\phi_A - \phi_B$ ) y también de un procedimiento para medir la fuerza electromotriz  $\mathcal{E}$  (asuntos que vemos más adelante).” (Guerra et al. 1985, p.285).*

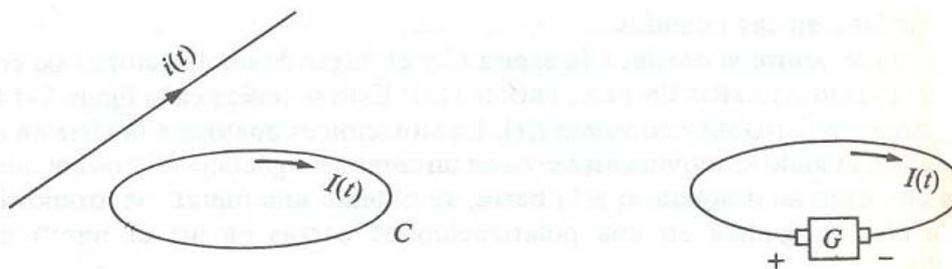
Más adelante alude a la condición para medir la fem de una pila:

*“Cuando el generador está abierto, la diferencia de potencial entre los bornes del mismo coincide ortodoxamente con nuestro concepto, puesto que hay una polarización de cargas, se establece un campo electrostático (contrario al campo electromotor)...” (Guerra et al. 1985, p.289).*

En el estudio de la ley de Faraday menciona una posible forma de medir fem inducida:

*“Cuando... se tiene una corriente transitoria  $i(t)$ , en una espira C se produce una corriente también transitoria  $I(t)$  que podemos interpretarla como originada en un generador ficticio que estuviera conectado a C, cuya fuerza electromotriz, en cada instante, coincide con la diferencia de potenciales que en el mismo instante mide un electromotor conectado a la espira.*

*La figura 7-15 ilustra esta interpretación” (Guerra et al. 1985, p.314).*



La corriente inducida  $I(t)$  la podemos interpretar como si fuera producida por un generador ficticio de fuerza electromotriz  $\mathcal{E}(t)$ .

Figura 7-15

El porcentaje de los libros de texto y su nombre que **mencionan** algún comentario sobre el criterio pero no se detienen a explicarlo o a proponer una cuestión-tarea ni proponen un ejemplo son: Para el criterio b.1 es el 31,3% y los libros son: Chabay y Sherwood (2011), Giancoli (2008), Guerra et al. (1985), Knight (2008) y Moore (2003). Para el criterio b.2 es el 12,5% y los libros son: Chabay y Sherwood (2011) y Moore (2003). Y, para el criterio b.5 no hubo libros que tienen en cuenta el criterio.

Los libros de texto y el correspondiente porcentaje que **no** enuncian ningún comentario o cuestión-tarea relacionados con los criterios b.1, b.2 y b.5 son:

Para el criterio b.1 es el 68.7% y los libros son: Alonso y Finn, (1995), Bauer y Westfall (2011), Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Hewitt y Wolf (2008), Halliday et al. (2002), Lea y Burke (2001), Ohanian y Markert (2007), Serway y Jewett (2010), Tipler y Mosca (2008), Wilson y Buffa (2003) y Young y Freedman (2004).

Para el criterio b.2 es el 81.2% y los libros son: Alonso y Finn, (1995), Bauer y Westfall (2011), Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Giancoli (2008), Hewitt y Wolf (2008), Halliday et al. (2002), Knight (2008), Lea y Burke (2001), Ohanian y Markert (2007), Serway y Jewett (2010), Tipler y Mosca (2008), Wilson y Buffa (2003) y Young y Freedman (2004).

Para el criterio b.5 es el 87.5% y los libros son: Alonso y Finn, (1995), Bauer y Westfall (2011), Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Giancoli (2008), Hewitt y Wolf (2008), Halliday et al. (2002), Knight (2008), Lea y Burke (2001), Moore (2003), Ohanian y Markert (2007), Serway y Jewett (2010), Tipler y Mosca (2008), Wilson y Buffa (2003) y Young y Freedman (2004).

Veamos algunos ejemplos:

### **Moore (2003)**

Aunque menciona que:

*“La diferencia de potencial  $|\Delta\phi|$  entre los electrodos de una batería es igual a la fem química de la batería sólo cuando no fluye corriente a través de ella...” (Moore 2003, p. 313).*

Explícitamente no menciona un procedimiento para medir fem mediante un voltímetro. Tampoco lo hace al presentar el fenómeno de inducción electromagnética.

**Halliday et al. (2002)** indica que la fem y la diferencia de potencial son iguales si la resistencia interna es cero o si la batería está en circuito abierto. Pero presenta el voltímetro como un dispositivo que sólo sirve para medir diferencias de potencial:

*“Al instrumento que sirve para medir las diferencias de potencial se le llama voltímetro. Para hallar la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera en el circuito, se conectan los terminales del voltímetro entre dichos puntos, sin abrir el circuito” Halliday et al. (2002, p. 147).*

- **¿Se enfatiza que el valor de la fem incluido en la ley de las mallas de Kirchhoff es una componente necesaria para aplicar el principio de conservación de la energía a los circuitos eléctricos?(Criterio b.3)**

Como se puede ver en la tabla 3.7 el porcentaje de los libros de texto que **Si** enuncian algún comentario explicativo suficiente o colocan una cuestión-tarea o bien explican el criterio mediante un ejemplo es el 37,5%. Estos libros son: Chabay y Sherwood (2011), Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Knight (2008), Ohanian y Markert (2007), Tipler y Mosca (2008) y Young y Freedman (2004). Veamos algunos ejemplos:

#### **Chabay y Sherwood (2011)**

Enuncia el principio de conservación de la energía aplicado a circuitos, la ley de las mallas de Kischhoff, diciendo:

*“Esta es esencialmente el principio de energía, pero sobre una base por coulomb. Recuerde que el potencial eléctrico es definido como energía potencial por unidad de carga...” (Chabay y Sherwood 2011, p. 768).*

Enseguida define el concepto de fem, notando que es una propiedad de la batería asociada a la separación de carga y que como resultado genera una diferencia de potencial. Afirma que la fem es:

*“... un concepto útil... para analizar circuitos en términos de fem y la diferencia de potencial en los elementos del circuito ligados a la batería” (Chabay y Sherwood 2011, p. 769).*

#### **Knight (2008)**

Nota que al aplicar la ley de Kirchhoff hay casos en los que el potencial se incrementa y eso implica hacer uno del concepto de fem:

“... el uso de la ley de las mallas de Kirchhoff... El potencial se incrementa como viajamos a través de la batería... después de haber ganado el potencial  $\mathcal{E}$ ...” (Knight 2008, p. 970).

### **Tipler y Mosca (2008)**

Enfatiza el papel de la fem en la ley de las mallas de Kirchhoff:

“Como un ejemplo del uso de la ley de las mallas de Kirchhoff, considere el circuito..., que contiene dos baterías... Deseamos encontrar la corriente en términos de las fems y las resistencias.” (Tipler y Mosca 2008, p.860).

### **Ohanian y Markert (2007)**

Relaciona explícitamente la noción de fem con la ley de Kirchhoff:

“la regla del voltaje de Kirchhoff, la cual expone que cuando vamos alrededor de algún camino cerrado en un circuito, la suma de todas las fems y todos los cambios de potencial a través de los resistores y otros elementos del circuito deben ser igual a cero.” (Ohanian y Markert 2007, p. 894).

Ningún libro fue clasificado en la columna **menciona**. Y, el 62,5% de los libros de texto **no** enuncian ningún comentario o cuestión-tarea relacionados con el criterio b.3. Estos libros son: Alonso y Finn, (1995), Bauer y Westfall (2011), Giancoli (2008), Guerra et al. (1985), Hewitt y Wolf (2008), Halliday et al. (2002), Lea y Burke (2001), Moore (2003), Serway y Jewett (2010) y Wilson y Buffa (2003). Veamos algunos ejemplos:

### **Halliday et al. (2002)**

Aunque afirma:

“Estas dos maneras de determinar la corriente en circuitos de una sola malla, una basada en la conservación de la energía y la otra en el concepto de potencial, son completamente equivalentes, porque las diferencias de potencial están definidas en términos del trabajo y de la energía” (Halliday et al. 2002, p. 140).

En ningún momento menciona el papel de la fem para este caso.

- **¿Se proponen actividades que involucran la elaboración de una hipótesis, el análisis de variables y/o actividades en las que las explicaciones o modelos tienen que ser justificados, tanto en el marco de los circuitos DC como en el estudio de la inducción electromagnética? (Criterios c.1, c.2 y c.3)**

Como se puede ver en la tabla 3.7 el porcentaje de los libros de texto analizados y su nombre que **Si** enuncian algún comentario explicativo suficiente o colocan una cuestión-tarea o bien explican los criterios c.1, c.2 y c.3 mediante un ejemplo son:

En el caso de c.1 es el 18.7% y los libros son: Chabay y Sherwood (2011), Knight (2008) y Ohanian y Markert (2007).

Para los criterios c.2 y c.3 hay coincidencia tanto en el porcentaje que es el 25% como en los libros: Chabay y Sherwood (2011), Knight (2008) y Ohanian y Markert (2007) y Young y Freedman (2004).

Veamos algunos ejemplos:

### **Chabay y Sherwood (2011)**

En el capítulo donde aborda “campo eléctrico y circuitos”, por ejemplo, propone hacer una demostración que implica hacer un análisis de las variables involucradas y aplicar el modelo mecánico de una batería:

*“Si las placas de una batería mecánica son muy grandes comparadas con la distancia  $s$  entre las placas, y el área de una placa es  $A$ , muestre que la cantidad de carga sobre una de las placas de una batería aislada está determinada por la fem de la batería:  $Q = A\epsilon_0(\text{fem})/s$ .” Chabay y Sherwood (2011, p. 769).*

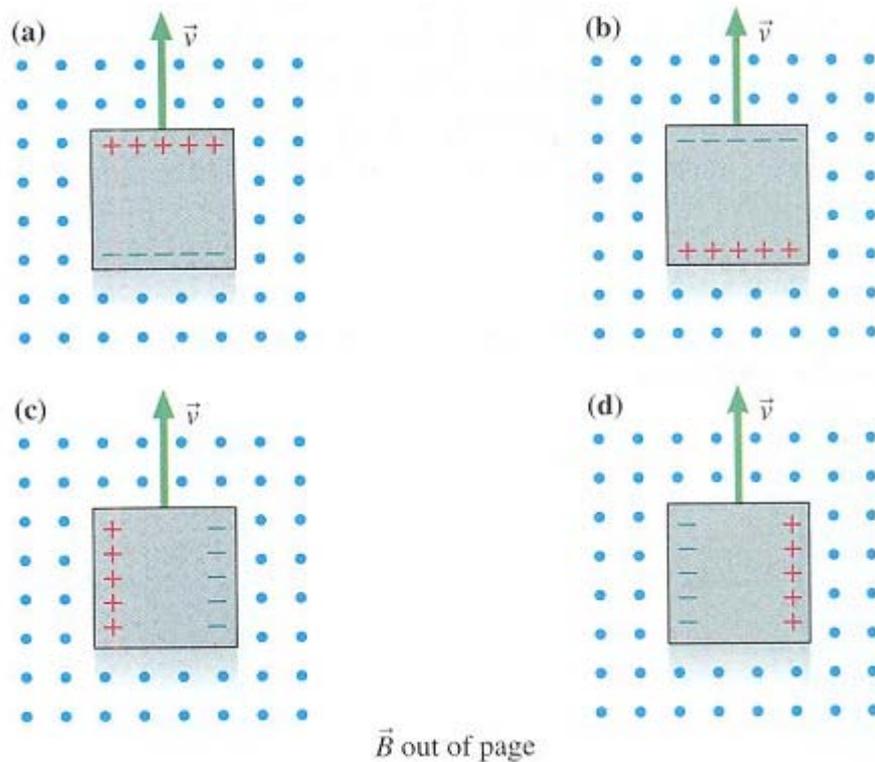
Posteriormente, en el capítulo titulado “Ley de Faraday”, analizando la generación de corriente mediante un campo eléctrico no coulombiano en un anillo metálico ubicado en un campo magnético variable, propone pensar lo siguiente:

*“La fem es la energía de entrada (no coulombiano) por unidad de carga. La fuerza (no coulombiano) por unidad de carga es el campo  $\vec{E}_{NC}$  (no coulombiano). Por lo tanto ¿cuál es la fem en términos de  $\vec{E}_{NC}$  para este anillo, si el anillo tiene un radio  $r$ ?” Chabay y Sherwood (2011, p. 950).*

### **Knight (2008)**

Presenta preguntas que llama ‘pare para pensar’ que permiten elaborar hipótesis, analizar variables y justificar las explicaciones o modelos utilizados, como por ejemplo:

“Un conductor cuadrado se mueve a través de un campo magnético uniforme. Cuál de las figuras muestra la distribución de carga correcta sobre el conductor? (Knight 2008, p. 1044).



Para los criterios c.1, c.2 y c.3 hay coincidencia tanto en el porcentaje (16.3%) como en el nombre del libro de texto (Guerra et al. 1985) que **menciona** algún comentario sobre estos criterios pero no se detienen a explicarlo o a proponer una cuestión-tarea ni proponen un ejemplo.

Los libros de texto y el correspondiente porcentaje que **no** enuncian ningún comentario o cuestión-tarea relacionados con los criterios c.1, c.2 y c.3 mediante un ejemplo son:

En el caso de c.1 es el 75% y los libros son: Alonso y Finn, (1995), Bauer y Westfall (2011), Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Giancoli (2008), Hewitt y Wolf (2008), Halliday et al. (2002), Lea y Burke (2001), Moore (2003), Serway y Jewett (2010), Tipler y Mosca (2008), Wilson y Buffa (2003) y Young y Freedman (2004).

Para los criterios c.2 y c.3 hay coincidencia tanto en el porcentaje que es el 68,7% como en los libros: Alonso y Finn, (1995), Bauer y Westfall (2011),

Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Giancoli (2008), Hewitt y Wolf (2008), Halliday et al. (2002), Lea y Burke (2001), Moore (2003), Serway y Jewett (2010), Tipler y Mosca (2008) y Wilson y Buffa (2003).

- ***¿Se relaciona el concepto de fem con otros capítulos y/o su importancia para el análisis energético de los fenómenos electromagnéticos? ¿Se proponen por lo menos tres tareas o ejemplos que explican la utilidad del estudio del concepto de fem en relación a la vida cotidiana, la tecnología o la ciencia (CTSA)? (Criterios d.1 y d.2)***

Como se puede ver en la tabla 3.7 el porcentaje de los libros de texto analizados y su nombre que **Si** enuncian algún comentario explicativo suficiente o colocan una cuestión-tarea o bien explican los criterios d.1 y d.2 mediante un ejemplo son:

En el caso de d.1 es el 37,5% y los libros son: Chabay y Sherwood (2011), Guerra et al. (1985), Knight (2008) y Ohanian y Markert (2007), Tipler y Mosca (2008) y Young y Freedman (2004).

En el caso de d.2 es el 18,7% y los libros son: Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993), Ohanian y Markert (2007) y Young y Freedman (2004).

El siguiente es un ejemplo que ilustra el criterio d.1:

### **Chabay y Sherwood (2011)**

En el capítulo titulado “Fuerza magnética”, explicando la generación de fem de movimiento en una varilla metálica que se mueve en un campo magnético uniforme, propone una pregunta que obliga al lector a retomar la definición de fem propuesta en el contexto de una batería:

*“La fem es el trabajo hecho por unidad de carga para mover una carga desde un extremo de una batería al otro, así ¿cuál es la fem de esta “batería”? Chabay y Sherwood (2011, p. 851).*

### **Tipler y Mosca (2008)**

Relaciona el concepto de fem con otros capítulos:

*“En capítulos previos, consideramos fems que estaban localizadas en una parte específica de un circuito, tal como entre los terminales de una batería. Sin embargo, las fems inducidas pueden estar distribuidas en todo el circuito.” (Tipler y Mosca 2008, p.961).*

El siguiente es un ejemplo que ilustra el criterio d.2:

### **Fishbane, Gasiorowicz y Thornton (1993)**

Enuncia varios ejemplos que permiten apreciar la utilidad del concepto de fem en relación a la CTSA:

*“Cuando pensamos en fuentes de fem, usualmente consideramos baterías, pero hay una amplia variedad de fuentes de energía eléctrica hechas por humanos. Un batería convierte energía química a una fem; una celda solar convierte la energía de la luz del sol a una fem; una termocupla produce una fem como un resultado de una diferencia de temperatura; una gran planta de potencia eléctrica comercial puede quemar carbón, gas, o combustible, o usar agua cayendo, para mover un generador que produce una fem.” (Fishbane, Gasiorowicz y Thornton 1993, p. 747)*

El porcentaje de los libros de texto y su nombre que **mencionan** algún comentario sobre los criterios d.1 y d.2 pero no se detienen a explicarlo o a proponer una cuestión-tarea ni proponen un ejemplo son: Para el criterio d.1 es el 12,5% y los libros son: Halliday et al. (2002) y Moore (2003). Para el criterio d.2 es el 31,3% y los libros son: Guerra et al. (1985), Halliday et al. (2002), Knight (2008), Moore (2003) y Tipler y Mosca (2008).

Veamos algunos ejemplos de ambos criterios d.1 y d.2:

### **Knight (2008)**

Da un ejemplo de la vida cotidiana para ilustrar el uso de baterías y el papel de la fem:

*“Muchos buenos consumidores, de flash para cámaras digitales, usan más de una batería ¿por qué? Un tipo particular de batería, tal como una batería AA o AAA produce una fem fija determinada por las reacciones químicas dentro...” (Knight 2008, p. 916).*

Más adelante afirma:

*“... La fem de la batería es la causa; corriente, calor, luz, sonido, etcétera son todos efectos que suceden cuando la batería es usada en ciertos modos...” (Knight 2008, p. 958).*

### **Tipler y Mosca (2008)**

Menciona una fuente de fem que permite vincular el estudio del concepto de fem con la vida cotidiana:

*“Las baterías reales tal como una buena batería de carro, usualmente tiene una resistencia interna del orden de pocos cientos de ohmios...” (Tipler y Mosca 2008, p.852).*

Posteriormente recurre a la misma clase de baterías para ilustrar el caso de baterías recargables:

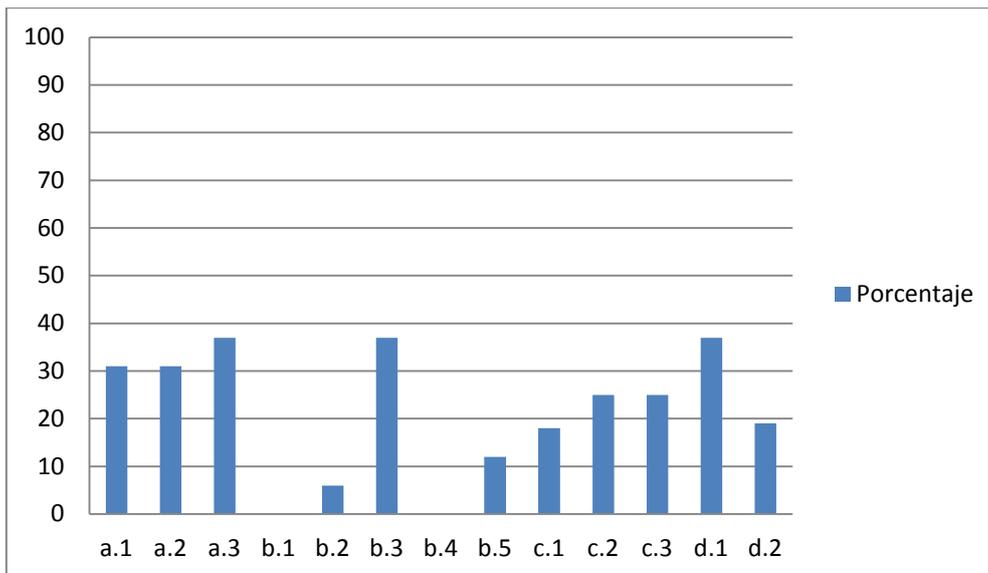
*“Algunas baterías reales tal como aquellas usadas en automóviles, son aproximadamente reversibles y pueden fácilmente ser recargadas.” (Tipler y Mosca 2008, p.862).*

**Moore (2003, p. 312-313)** presenta como ejemplo práctico de una batería, la batería automotriz plomo-ácido y hace un análisis energético para explicar su funcionamiento. Pero no menciona explícitamente la importancia del concepto de fem para el análisis energético de los fenómenos electromagnéticos, o en relación a la CTSA.

**Halliday et al. (2002)** define fem como trabajo por unidad de carga en el contexto de circuitos DC y en el capítulo donde aborda el fenómeno de inducción electromagnética lo emplea para establecer la relación entre fem y campo eléctrico inducido. Pero no menciona la importancia de la fem en el análisis energético de los fenómenos electromagnéticos.

Los autores aluden, antes de introducir la noción de fem, a una gran variedad fuentes de fem, tanto en el caso de circuitos DC como de inducción electromagnética Halliday et al. (2002, p. 137), aunque no profundiza en los distintos mecanismos.

En el gráfico 3.1 se muestra el porcentaje de los libros de texto analizados que tienen en cuenta los criterios de análisis considerados en el protocolo de análisis que se ha aplicado, tabla 3.7. En la línea vertical se representa el porcentaje de libros y en la línea horizontal el número del criterio.



**Gráfico 3.1 Porcentaje de libros que tienen en cuenta los criterios de análisis**

Como se puede apreciar en la gráfica 3.1, a propósito de los criterios de análisis a.1 y a.2, la presentación de la noción de fem en relación con la acción de campos no conservativos y su diferenciación con el concepto de diferencia de potencial, sólo la tercera parte de los libros contempla estos criterios de forma satisfactoria. En contraste, un poco más de la mitad de los libros no los abordan. Y, en el caso de la no distinción entre los conceptos de fem y diferencia de potencial, como los ejemplos lo ilustran hay casos en que se supone que son sinónimos.

En cuanto al criterio a.3, que enfatiza que el concepto de fem es único aunque existen diversas formas de calcularlo y medirlo, la consideración del criterio cercana al 40% coincide con los libros que no lo consideran. Estos últimos suelen no vincular la noción de fem presentada en el contexto de circuitos DC con la de fem inducida.

Ningún libro contempla el criterio b.1, sólo la tercera parte menciona que el valor de la fem de una pila coincide con el valor de la diferencia de potencial en circuito abierto, pero no se hace referencia a un procedimiento de medida.

Un poco menos del 40% de los libros hace énfasis en el papel de la noción de fem en la ley de las mallas de Kirchhoff, mientras que más del 60% al presentar esta ley sólo se refiere a las caídas de potencial.

Entre el 18% y el 25% de los libros proponen actividades que involucran la elaboración de hipótesis, análisis de variables y la necesidad de justificar las explicaciones o modelos, es decir los criterios c.1, c.2 y c.3. En contraste, entre el 68.7% y el 75% de los libros no aborda estos criterios.

El 37,5% de los libros contempla el criterio d.1 de forma satisfactoria, es decir propone o afirma la relación del concepto de fem con diferentes capítulos y/o enfatiza su importancia en el análisis energético de los fenómenos electromagnéticos. El 50% de los libros no lo aborda.

El 18,7% de los libros explican la utilidad del estudio del concepto de fem en relación a la vida cotidiana, la tecnología o la ciencia, es decir el criterio d.2. El 31% apenas lo menciona y el 50% no contempla el criterio.

Por último, observando los resultados de todos los criterios, llama la atención que el máximo de libros de texto que contempla satisfactoriamente alguno de los criterios es del 37,5%. No se dio el caso de algún libro que considerara todos los criterios o la mayoría. Los libros que no contemplan ninguno, uno o varios criterios está entre el 37,5% y el 100%.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES FINALES Y PERSPECTIVAS DE TRABAJO

*“Poincare afirma que el conocimiento científico relevante para futuros profesores es diferente al que necesitan futuros ingenieros, siendo de más alta calidad conceptual y más orientado a los fundamentos.”*

*(Tseitlin y Galili 2005, p.235)*

La investigación en la enseñanza-aprendizaje de la física es una fuente de información acerca de dificultades específicas de los estudiantes. Estas dificultades son una buena fuente de ideas y problemas, demostraciones, y experimentos de laboratorio. Los errores detectados se pueden modificar y adaptarlos para cumplir la misma función durante la enseñanza. Los hallazgos de esta investigación pueden guiar el diseño de pretest que se pueden usar antes y durante las actividades de las clases, laboratorios, o secciones de discusión. Si antes de presentar los procedimientos cuantitativos, se hacen preguntas cualitativas que requieren explicaciones de razonamiento puede comprometer el interés de los estudiantes, enfocar su atención en temas claves, y fomentar la reflexión. Para que este enfoque sea efectivo, los exámenes de curso deben incluir preguntas de tipo similar. A menos que los estudiantes piensen que ellos tienen que demostrar conocimiento a un nivel conceptual significativo en las evaluaciones, muchos no invertirán el tiempo y el esfuerzo necesario para lograr un dominio alto.

Hay una condición crítica que se debe cumplir para que el tipo de enseñanza descrito sea efectivo. Se debe cultivar una atmosfera no peyorativa en el aula o laboratorio. Los errores deben ser vistos como oportunidades para aprender, y a los estudiantes se les debe dar la oportunidad de demostrar que han aprendido. El método de calificar debe ser lo suficientemente flexible para reflejar el progreso de ellos.

Ayudar a los estudiantes a desarrollar una comprensión conceptual sólida no se trata sólo de hacer una lista de concepciones alternativas y explicar los errores que ellos deben evitar. Existe evidencia considerable de que los estudiantes frecuentemente no hacen el mismo error bajo todas las circunstancias. Un error particular puede ser evocado bajo un conjunto de condiciones pero no bajo otro. El contexto puede ser el factor determinante. Un error puede ser un síntoma de una dificultad conceptual o de una dificultad de razonamiento que subyace, o una combinación de las dos. Si un fallo de razonamiento está en el corazón de la dificultad con un concepto, enfocar la enseñanza solamente en el concepto no proporciona a los estudiantes con el tipo de ayuda necesaria.

Quizás la razón más fuerte para no advertir a los estudiantes acerca de errores comunes es que tal enfoque rara vez es efectivo. Generalmente no es muy útil decirles a los estudiantes que errores no deben cometer. La advertencia casi siempre es mal entendida. A menudo un error descrito por un profesor puede parecer trivial a un estudiante y así la advertencia puede ser desestimada como irrelevante. Algunas veces si los estudiantes reconocen su susceptibilidad para hacer un error particular, ellos pueden esforzarse por suprimir esa tendencia haciendo una nota en su mente para no hacer ese error particular. Sin embargo, la dificultad subyacente que es la causa real del error puede quedar latente y salir a la superficie inesperadamente bajo otro conjunto de circunstancias. Las dificultades conceptuales y de razonamiento no pueden ser superadas a través de aserciones por parte del profesor. Tales cambios en el pensamiento requieren un compromiso intelectual por parte del estudiante. Un método probablemente efectivo para abordar dificultades serias es el diseño de la enseñanza para exponerlas y abordarlas específicamente, no sólo una vez sino varias veces.

El diseño de materiales de enseñanza que relacionen las necesidades y habilidades de los estudiantes requiere un conocimiento detallado acerca de las dificultades conceptuales y de razonamiento encontradas en el estudio de un tema particular. Por ello esta tesis se ha enfocado en un tema de interés

particular como es el concepto de fem en los cursos de electromagnetismo de nivel universitario.

Las dificultades conceptuales y de razonamiento encontradas en los estudiantes al analizar el concepto de fem varían en gravedad y frecuencia. Algunas dificultades pueden tender a desaparecer si la enseñanza mejora, pero otras pueden persistir indefinidamente e interferir con el aprendizaje de temáticas más avanzadas.

Algunas concepciones alternativas se pueden deber a experiencia limitada, como por ejemplo prácticas de laboratorio. Otras pueden resultar de una interpretación equivocada de experiencias previas, como por ejemplo el suponer que el nombre de fuerza electromotriz implica que esta es una fuerza. En tales casos, una concepción alternativa puede asumir la resistencia de una creencia. Las dificultades a este nivel han probado ser altamente resistentes a la enseñanza convencional, lo que implica dar más atención a estas dificultades.

El análisis de las explicaciones de los estudiantes, presentado a partir de los resultados de la aplicación de los tres cuestionarios y de las dos entrevistas realizadas, pone de manifiesto un uso indiscriminado del lenguaje, el cual refleja la naturaleza fragmentaria de su entendimiento. La falta de consistencia frecuentemente hace imposible interpretar sin ambigüedades el significado que un estudiante le atribuye a un término particular.

Para llevar a cabo un cambio conceptual significativo, es necesario comprometer a los estudiantes en un nivel intelectual suficientemente profundo. Sin embargo, en los cursos introductorios de física típicos la experiencia de aprendizaje para muchos estudiantes es pasiva. El criterio para medir el desarrollo académico alcanzado, usado con más frecuencia es la habilidad para solucionar problemas cuantitativos estándar. En el estudio del concepto de fem en el contexto del fenómeno de inducción electromagnética y en el de circuitos dc, la atención de los estudiantes se suele dirigir primeramente hacia la solución de problemas cuantitativos. Por ejemplo, en el caso de circuitos prevalece la solución de problemas a través del uso de la ley de Ohm y de las

leyes de Kirchhoff. En general, la clase de preguntas que pueden fortalecer el desarrollo conceptual y la habilidad de razonamiento científico habitualmente no se plantean. Sin embargo, proporcionar a los estudiantes experiencias prácticas de experimentos estándar no asegura que el desarrollo conceptual tendrá lugar en la misma medida que se aprenden habilidades de laboratorio. Es poco realista esperar que las prácticas de laboratorio que no consideren las dificultades de los estudiantes logren lo que las clases teóricas no logran.

De acuerdo a las categorías de descripción que se establecieron a partir del un análisis fenomenográfico de los resultados de los cuestionarios implementados, y que fueron corroborados por el análisis de las entrevistas, algunas de las dificultades de comprensión del significado del concepto de fem son:

- Confusión entre el significado de fem y otros conceptos:
  - Confusión entre el significado de fem y el de diferencia de potencial
  - Confusión entre el significado de fem y el de corriente eléctrica
  - Confusión entre el significado de fem y el de fuerza
  - Confusión entre el significado de fem y el de energía
  - Confusión entre el significado de fem y el de trabajo
- Suponer, en el contexto de circuitos eléctricos, que la ley de Ohm representa el balance de energía (confusión entre una ley experimental y un principio de conservación de la física).
- Presumir que existen dos conceptos de fem, uno ligado a circuitos eléctricos y otro vinculado con el fenómeno de inducción electromagnética.

Las estrategias específicas que se diseñen para abordar las dificultades de aprendizaje del concepto de fem identificadas, deben considerar que tales dificultades son interdependientes y se refuerzan mutuamente. Ellas no pueden ser aisladas una de otra y por lo tanto deben ser abordadas conjuntamente. Además, la utilización de una única estrategia rara vez es suficiente para llevar a cabo un cambio conceptual significativo.

El proceso de construir un modelo conceptual puede ayudar a los estudiantes a sintetizar conceptos básicos como el de fem en un marco coherente. Sin embargo, distintas investigaciones muestran que el uso de un modelo construido como una estrategia de enseñanza usualmente no es suficiente. Muchos estudiantes no pueden desarrollar una comprensión funcional de un tema a menos que ciertas dificultades se aborden explícitamente.

El aprendizaje significativo, el cual connota la habilidad para interpretar y usar el conocimiento en situaciones no idénticas a aquellas en las cuales inicialmente fue adquirido, requiere un compromiso mental profundo por parte del alumno. La mente del estudiante no es una tabula rasa sobre la cual nueva información se puede escribir sin considerar lo que ya está allí. Si el profesor no hace un esfuerzo consciente para guiar al estudiante a hacer las modificaciones necesarias para incorporar correctamente nueva información, el estudiante puede hacer una reordenación. En este caso, el mensaje inscrito sobre la tabula puede no ser el que el profesor pretende entregar.

Las deficiencias de los libros de texto en torno a la presentación del concepto de fem ponen de manifiesto la necesidad de que los profesores hagan un uso crítico de ellos y diseñen materiales complementarios que faciliten la construcción de los significados de los conceptos estudiados. En particular se debe prestar atención a:

- La presentación de la noción de fem en relación con la acción de campos no conservativos y su diferenciación con el concepto de diferencia de potencial.
- Resaltar que el concepto de fem es único aunque existen diversas formas de calcularlo y medirlo. En particular, mostrar que la fem inducida o la fem de una batería son diversas formas de generar una fem.
- Indicar diversos procedimientos para medir la fem de un sistema físico específico
- Enfatizar que para comprender la ley de las mallas de Kirchhoff es necesario considerar las fems del circuito. Y en este sentido, el papel de la fem para analizar el balance energético del sistema y por lo tanto poder aplicar el principio de conservación de energía.

- Mostrar ampliamente la utilidad del estudio del concepto de fem en relación a la vida cotidiana, la tecnología o la ciencia.

Finalmente y de acuerdo a lo anterior, una perspectiva de trabajo que se deriva de esta investigación, y de acuerdo con un enfoque constructivista de la enseñanza y el aprendizaje, el cual toma en consideración las concepciones de los estudiantes, es el uso de los resultados de esta tesis para diseñar secuencias de aprendizaje y materiales escritos que propicien una comprensión más significativa y holística del concepto de fem.

## BIBLIOGRAFÍA

AAAS (American Association for the Advancement of Science). (1990). *Science for all American*. New York: Oxford University Press.

ABD-EL-KHALICK, F. y LEDERMAN N. G. (2000). Improving science teachers' conceptions of the nature of science: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 22, pp 665-701.

ABD-EL-KHALICK, F. (2001). Embedding nature of science instruction in preservice elementary science courses: Abandoning scientism, but... *Journal of Science Teacher Education*, 12 (3), pp 215-233.

ANDERSON C. W. (2008). Perspectives on science learning. En A. K. Abell y N.G. Lederman, *Handbook of research on science education*, (pp 3-30). New York: Routledge.

AKERLIND, G. S. (2005). Variation and commonality in phenomenographic research methods. *Higher Education Research and Development*, 24 (4), pp 321-334.

ALEXANDER, P. A. y Kulikowich, J. M. (1994). Learning from physics text: A synthesis of recent research. *Journal of Research in Science Teaching*, 31, pp 895-911.

ALMUDÍ-GARCÍA, J. M. (2001). *Introducción del concepto de campo magnético en primer ciclo de universidad: dificultades de aprendizaje y propuesta de enseñanza alternativa de orientación constructivista*. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco, España.

ARCÁ, M., GUIDONI, P. y MAZOLI, P.(1990). *Enseñar ciencia. Cómo empezar: reflexiones para una educación científica de base*. Barcelona: Paidós Educador.

ARONS, A. B. (1970). *Evolución de los conceptos de la física*. México: Editorial Trillas.

ARONS, A. B. (1982). Phenomenology and logical reasoning in introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 50 (1), pp 13-20.

ARONS, A. B. (1997). *Teaching introductory physics*. New York: Willey.

ARCHIBALD, T. (1986). Carl Neumann versus Rudolf Clausius on the propagation of electrodynamic potentials. *American Journal of Physics*, 54 (9), pp 786-790.

AUSUBEL, D. P. (2002). *Adquisición y retención del conocimiento: una perspectiva cognitiva*. Barcelona: Paidós.

BARTHOLOMEW, H., OSBORNE J., y RATCLIFFE, M. (2004). Teaching students "ideas about science": Five dimensions of effective practice. *Science Education*, 88, pp 655-682.

BECKER, R. (1982). *Electromagnetic Fields and Interactions*. New York: Dover Publications.

BENSEGHIR, A. Y CLOSSET, J.L. (1996). The electrostatics-electrokinetics transition : historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, 18 (2), pp 179-191.

BEVILAQUA, F. y GIANNETTO, E. (1998). The History of Physics and European Physics Education. En *International Handbook of Science Education*. Vol II, pp 1015-1026. Kluwer Academic Publisher.

BERKSON, W. (1981). *Las teorías de los campos de fuerza: Desde Faraday hasta Einstein*. Madrid: Alianza Editorial.

BOAS, M. L. (1983). *Mathematical methods in the physical sciences*. USA: John Wiley.

BRANCO, A. y VALSINER J. (Eds.). (2004). *Communication and meta communication in human development*. USA: Information Age Publishing.

BROWN, T. M. (1969), The electrical current in Early Nineteenth-Century French Physics. *Historical Studies in the physical Sciences*. 1, pp 61-103.

BUCHWALD, J. Z. (1977). William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics. *Historical Studies in the Physical Science*, 8, pp 101-136

BUCHWALD, J. Z. (1985), *From Maxwell to Microphysics. Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century*. USA: University of Chicago Press.

CANEVA, K. L. (1978), From Galvanism to Electrodynamics: The Transformation of German Physics and Its Social Context, *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol 9, pp 63-159.

CAREY, S. (1987). *Conceptual change in childhood*. London: The MIT Press.

CHABAY, R. y SHERWOOD, B. (2002). *Matter and interactions, Vol. II*. USA: John Wiley.

CHABAY R. y SHERWOOD, B. (2006). Restructuring the introductory electricity and magnetism course. *American Journal of Physics*, 74 (4), pp 329-336.

CHALMERS, A. F. *La ciencia y cómo se elabora*. Madrid: Siglo XXI.

CHI, M.H.T., SLOTTA, J.D. y LEEUW, N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instructions*, 4, pp 27- 43.

CLOUGH, M.P., OLSON, J.K. (2004). The nature of science: Always part of the science story. *The Science Teacher*, 71 (9), pp 28-31.

COBERN, W. (1991). Contextual constructivism: the impact of culture on the learning and teaching of science. Artículo presentado en el Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching, Wisconsin-USA. [On-line]. Disponible en: <http://eric.ed.gov/PDFS/ED338488.pdf>. Recuperado: 22/11/2011.

COHEN, R., EYLON, B. y GANIEL, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51 (5), pp 407-412.

COHEN, L. y MANION, L. (1990). *Métodos de Investigación Educativa*. Madrid: Editorial La Muralla.

DRIVER, R. (1986). Psicología cognitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 4 (1), pp 3-16.

DRIVER, R. (1989). Student's conceptions and the learning of Science. *International Journal of Science Education*, 11, pp 481-490.

DRIVER, R., GUESNE, E. y TIBERGHIE, A. (1989). *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Madrid: Ediciones Morata.

DRIVER, R., ASOKO, H., LEACH, J., MORTIMER, E. y SCOTT, P. (1994a). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23 (7), pp 5-12.

DRIVER, R., SQUIRES, A., RUSHWORTH, P. y WOOD-ROBINSON, V. (1994b). *Dando sentido a la ciencia en secundaria: Investigaciones sobre las ideas de los niños*. Madrid: Aprendizaje Visor.

DRIVER, R., LEACH, J., MILLAR, R. y SCOTT, P. (1996) *Young peoples images of science*. Bristol: Open university Press

DRIVER, R., NEWTON, P. y OSBORNE, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science Education*, 84 (3), 287-312.

DUIT, R., NIEDDERER, H. y SCHECKER, H. (2008). *Teaching Physics*. En A. K. Abell y N.G. Lederman, *Handbook of research on science education*, (pp 599-628). New York: Routledge.

DUIT, R. (2009). *Bibliography: Students' and Teachers' conceptions and science education*. Kiel-Germany (Institute for Science Education at the

University of Kiel). Base de datos disponible en <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>. Recuperado el 22/11/2011.

DUSCHL, R.A. (1990). *Restructuring science education*. New York: Teachers College Press.

DUSCHL, R. A. y GITOMER, D. (1991). Epistemological perspectives on conceptual change: implications for educational practice. *Journal of Research in Science Teaching*. 28 (9), pp 839-858.

DUSCHL, R. A. (1994). *Research on the history and philosophy of science*. En D. L. Gabel (Eds), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (pp 443-465). New York: McMillan Pub.Co.

DUSCHL, R. A. (2008). *Quality argumentation and epistemic criteria*. En S. Erduran y M. P. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education: Perspectives from classroom-based research* (pp 47-69). Dordrecht: Springer.

EINSTEIN, A. y INFELD, L. (1939). *La física aventura del pensamiento*. Buenos Aires: Losada.

ERDURAN, S. (2008). *Methodological foundations in the study of argumentation in science classrooms*. En S. Erduran y M. P. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education: Perspectives from classroom-based research* (pp 47-69). Dordrecht: Springer.

ETKINA, E., KARELINA, A. y RUIBAL-VILLASENOR M. (2008). How long does it take? A study of student acquisition of scientific abilities. *Phys. Rev. ST Physics Ed. Research*. 4, 020108, (15 pages).

EUROPEAN COMMISSION. (2007). *Science education now: A renewed pedagogy for the future of Europe*. Brussels, Belgium: European Commission, Directorate-General for Research.

FARADAY, M. (1849). *Experimental Researches in Electricity*. London: Richard and John Edward Taylor.

FEYNMAN, R., LEIGHTON, R. B. y SANS, M. (1987). *Física. Volumen II: Electromagnetismo y material*. USA: Addison-Wesley Iberoamericana.

FISHER, L.H. y VARNEY, R.N. (1976). Contac potentials between metals: History, concepts, and persistent misconceptions. *American Journal of Physics*, 44 (5), pp 464-475.

FREDETTE, A. y LOCHHEAD, J. (1981). Student's conceptions of electric current. *The Physics Teacher*, 18, pp 194-198.

FURIÓ, C. y GUIASOLA, J. (2001). La enseñanza del concepto de campo eléctrico basada en un modelo de aprendizaje como investigación orientada. *Enseñanza de las Ciencias*, 19 (2), pp 319-334.

FURIÓ, C., GUIASOLA J., ALMUDÍ J.M. y CEBERIO M. (2003). Learning the electric field concept as oriented research activity. *Science Education*, 87, pp 640-662.

GALILI, I., KAPLAN, D. y LEHAVI, Y. (2006). Teaching Faraday's law of electromagnetic induction in a introductory physics course. *American Journal of Physics*, 74 (4), pp 337-343.

GIL-PÉREZ, D. (1983). Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 1(1), pp 26-33.

GIL-PÉREZ, D. (1986). La metodología científica y la enseñanza de las ciencias. Unas relaciones controvertidas. *Enseñanza de las Ciencias*, 4(2), pp 111-121.

GIL-PÉREZ, D., CARRASCOSA, J., DUMAS-CARRÉ, A., FURIÓ, C., GALLEGO, R., GENE-DUCH, A., GONZALEZ, E., GUIASOLA, J., MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., PESSOA DE CARVALHO, A., SALINAS, J., TRICARICO, H. y VALDÉS, PABLO. (1999). ¿Puede hablarse de consenso constructivista en la educación científica?. *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (3), pp 503-512.

GIL-PÉREZ, D., MACEDO, B., MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., SIFREDO, C., VALDÉS, P. y VILCHES, A. (Editores). (2005). *¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años*. Chile: Oficina Regional de Educación de la UNESCO para América Latina y el Caribe.

GUIASOLA, J., ZUBIMENDI, J. L., ALMUDÍ, J. M. y CEBERIO, M. (2002). The evolution of the concept of capacitance throughout the development of the electric theory and the understanding of its meaning by university students. *Science and Education*, 11 (3), pp 247-261.

GUIASOLA, J., ZUBIMENDI, J.L., ALMUDI, J.M., y CEBERIO, M.J. (2008a). Dificultades Persistentes en el Aprendizaje de la Electricidad: Estrategias de Razonamiento de los Estudiantes al Explicar Fenómenos de Carga Eléctrica. *Enseñanza de las Ciencias*, 26(2), pp 177-192.

GUIASOLA, J., MONTERO, A. y FERNÁNDEZ, M. (2008b). La historia del concepto de fuerza electromotriz en circuitos eléctricos y la elección de indicadores de aprendizaje comprensivo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(1), 1-8.

GUIASOLA, J., FURIO, C. y CEBERIO, M. J. (2008c). Science Education Based on Developing Guided Research. *Science Education in Focus* (pp. 173-201). New York: Editorial Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge.

GUIASOLA, J., ZUBIMENDI, J.L. y ZUZA, K. (2010). How much have students learned? Research-based teaching on electrical capacitance. *Physics/*

*Review Special Topics: Physics Education Research*, 6(2), 0201021-02010210.  
Disponible en <http://sites.google.com/site/guisasolapages/scientific-papers>

GUISASOLA, J., ALMUDI, J.M. and ZUZA, K. (2011). University Students' understanding of Electromagnetic Induction. *International journal of Science Education*. DOI:10.1080/09500693.2011.624134. Disponible en <https://docs.google.com/open?id=0BxypYfxscKk9ZjhjZDM0MDctMDkyMi00YWVhLTk5NTctMTE4ZTIyMGI1MDMw>

GUISASOLA, J., GARMENDIA, M., MONTERO, A. y BARRAGUES, J. I. (2012). Una propuesta de utilización de los resultados de la investigación didáctica en la enseñanza de la física. *Enseñanza de las Ciencias* 30(1), 49-60).

GUNSTONE, R., MULHALL, P. y McKITTRICK, B. (2009). Physics teachers' perceptions of the difficulty of teaching electricity. *Research in Science Education*, 39, pp 515-538.

HAERTEL, H. (1987). *A Qualitative Approach to Electricity*. Palo Alto, USA: Institute for Research on Learning.

HARRISON, A. G. (2001). How do teachers and textbook writers model scientific ideas for students? *Research in Science Education*, 31, pp 401-435.

HEILBRON, J. L. (1982). *Elements of early modern physics*. USA: University of California Press.

HERTZ, H. (1990). *Las ondas electromagnéticas. Selección de las Untersuchungen, con introducción, traducción, notas y apéndices a cargo de Manuel García Doncel y Xavier Roqué*. Barcelona: Publicaciones de la Universidad Autónoma de Barcelona.

HILL, S. E. (2010). Rephrasing Faraday's law. *The Physics Teacher*, 48, pp 410-412.

HODSON, D. (1985). Philosophy of science, science and science education. *Studies in Sciences Education*, 12, pp 25-57.

HODSON, D. (1992). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science education*, 14, pp 541-562.

HODSON, D. (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias*, 12, pp 299-313.

IZQUIERDO, M. y ADURIZ-BRAVO, A. (2003). Epistemological foundations of school science. *Science and Education*, 12, pp 27-43.

JEFIMENKO, O. (1962). Demonstration of the electric fields of current-carrying conductors. *American Journal of Physics*, 30 (1), pp 19-21.

JEFIMENKO, O. (1989). *Electricity and Magnetism: An introduction to the theory of electric and magnetic fields*. Virginia: Electret Scientific, Star City.

JEFIMENKO, O. (2004). Presenting electromagnetic theory in accordance with the principle of causality. *European Journal of Physics*, 25, pp 287-296.

JIMENEZ-ALEIXANDRE, M. P. y DÍAZ DE BUSTAMANTE, J. (2003). Discurso de aula y argumentación en la clase de ciencias: Cuestiones teóricas y metodológicas. *Enseñanza de las Ciencias*, 21 (3), pp 359-370.

JIMENEZ-ALEIXANDRE, M. P. y ERDURAN, S. (2008). *Argumentation in science education: An overview*. En S. Erduran y M. P. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education: Perspectives from classroom-based research* (pp 3-27). Dordrecht: Springer.

KELLY, G. J. y TAKAO, A. (2002). Epistemic levels in argument: An analysis of university oceanography student's use of evidence in writing. *Science Education*, 86, pp 314-342.

KIM, E. y PAK, S. J. (2002). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *American Journal of Physics*, 70 (7), pp 759-765.

KLEIN, W. (1981). Experimental "paradox" in electrodynamics. *American Journal of Physics*, 49 (6), pp 603-604.

KNIGHT, R. D. (2008). *Physics for scientists and engineers: a strategic approach*. USA: Pearson Education.

KOULAUDIS, V. y TSATSARONI, A. (1996). A pedagogical analysis of science textbooks: How can we proceed? *Research in Science Education*, 26, pp 55-71.

KUHN, T. (1975). *La estructura de las revoluciones científicas*. España: Fondo de Cultura Económico.

KUHN, T. (1984), Professionalization recollected in tranquility, *ISIS*, 75 (1), pp 29-33.

KRAGH, H. (2000). Confusion and Controversy: Nineteenth-Century Theories of the Voltaic Pile. En F. Bevilacqua y L. Fregonese (Eds.). *Nuova Voltiana: Studies on Volta and his times*, pp 133-157. Editore Ulrico Hoepli. Milano.

KIPNIS, N. (2003). Changing a Theory: The case of Volta's contact electricity. En F. Bevilacqua y E.A. Giannetto (Eds.). *Volta and the history of electricity*, pp 17-35. Università degli studi di Pavia. Milano: Hoepli.

KELLOGG, O. D. (1954). *Foundations of Potential Theory*. Dover Publications: New York.

KELLY, G. A. (2001). *Psicología de los constructos personales: Textos escogidos*. B. Maher (Comp.). Barcelona: Paidós.

LANZARA, E. y ZANGARA, R. (1995). Potential difference measurements in the presence of a varying magnetic field. *Physics Education*, 30 (2), pp 85-89.

LAKATOS, I. (1982). *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza

LEACH, J. y SCOTT, P. (2002). Designing and evaluating science teaching sequences: An approach drawing upon the concept of learning demand and a social constructivist perspective on learning. *Studies in Science Education*, 38, pp 115-142.

LEACH, J. y SCOTT, P. (2003). Individual and sociocultural views of learning in science education. *Sciences and Education*, 12, pp 91-113.

LEGAULT, N. y PESCHARD, D. (2001). Concerning the electromotive force (or emf). *The Physics Teacher*, 39 (2), pp 69.

LOPEZ-RODRÍGUEZ, R. y JIMENEZ-ALEIXANDRE, M. P. (2007). ¿Podemos cazar ranas? Calidad de los argumentos de alumnado de primaria y desempeño cognitivo en el estudio de una charca. *Enseñanza de las Ciencias*, 25 (3), pp 309-324.

MARAZZINI, P. y TUCCI, P. (1983). The physical meaning of Faraday's law from an historical point of view. *European Journal of Physics*, 4, pp 170-179.

MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., DOMÈNECH, J. L. y VERDÚ, R. (1993). Del derribo de ideas al levantamiento de puentes: la epistemología de la ciencia como criterio organizador de la enseñanza en las ciencias física y química. *Curriculum. Revista de teoría, investigación y práctica educativa*, 7, pp 67-90.

MARTON, F. (1981). Phenomenography: Describing conceptions of the world around us. *Instructional Science*, 10, pp 177-200.

MARTON, F. y BOOTH, S. (1997). *Learning and Awareness*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

MARTON, F. y PONG, W. Y. (2005). On the unit of description in phenomenography. *Higher Education Research and Development*, 24 (4), pp 335-348.

MATTHEWS, M.R. (1994). *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. New York: Rontdlege.

MAXWELL, J. C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol.1*. London: Macmillan and co.

MAXWELL, J. C. (1881). *A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol.2*. London: Oxford University Press.

McCOMAS, W.F., CLOUGH, M.P. y ALMAZORA, H. (1998). The role and character of the nature of science in Science Education. En W. F. McComas (Ed). *The nature of science in Science Education. Rationales and strategies*, (pp 3-39). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

McCOMAS, W.F. (1998). The principal elements of the nature of science: Dispelling the Myths. En W. F. McComas (Ed). *The nature of science in Science Education. Rationales and strategies*, (pp 53-70). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

McDERMOTT, L. C. y SHAFFER, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60 (11), pp 994-1003.

McDERMOTT, L. C. (1991). Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned – Closing the gap. *American Journal of Physics*, 59 (4), pp 301-315.

MELLADO, V. (1998). The classroom practice of preservice teachers and their conceptions of teaching and learning science. *Science Education*, 82, pp 197-214.

MONTERO, A. (2007). *El concepto de fuerza electromotriz en la interpretación de circuitos de corriente estacionaria. Análisis crítico de su enseñanza y propuesta didáctica alternativa*. Tesis doctoral. Universidad de Granada, España.

MONTGOMERY, H. (1999). Unipolar induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism. *European Journal of Physics*, 20, pp 271-280.

MOREIRA, M. A. y GRECA, I. M. (2003). Cambio conceptual: Análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. *Ciencia y Educação*, 9 (2), pp 301-315.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1996) *National Science education standards*. Washington DC: National Academic Press.

NERSESSIAN, N. J. (1989). Conceptual Change in science and in science education. *Sinthese*, 80, pp 163-183.

NERSESSIAN, N.J. (1995). Should physicist preach What they practice?. *Science and Education*, 4, pp 203-226.

NERSESSIAN, N.J. (2008). *Creating Scientific Concepts*. USA: MIT Press.

NIAZ, M. (2008). What “ideas-about-science” should be taught in school science? A chemistry teachers’ perspective. *Instructional Science*, 36, pp 233-249.

NIAZ, M. y FERNÁNDEZ, R. (2008). Understanding quantum numbers in general chemistry textbooks. *International Journal of Science Education*, 30(7), pp 869-901.

NOVAK, J. D. (1988). Constructivismo humano: un consenso emergente. *Enseñanza de las Ciencias*. 6 (3), pp 213-223.

NRC (National Research Council). (2000). *Inquiry and the National Science Education Standards*. Whashington: National Academy Press/National Research Council.

NOVAK, J. D. y GOWIN, D. B. (1988). *Aprendiendo a aprender*. Barcelona: Ediciones Martínez Roca.

OGBORN, J., KRESS, G. y MARTINS, I. (1998). *Formas de explicar: la enseñanza de las ciencias en Secundaria*. Madrid: Santillana.

OSBORNE, R. y WITTROK, M. (1985). The generative learning model and its implications for science education. *Studies in Science Education*, 12, pp 59-87.

PAGE, C. H. (1977). Electromotive force, potencial difference, and voltage. *American Journal of Physics*, 45 (10), pp 978-980.

PANCALDI, G. (1990). Electricity and life. Volta’s path to the battery. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*. 21, pp 123-160.

PANOFSKY, W. y PHILLIPS, M. (1972). *Classical Electricity and Magnetism*. USA: Addison-Wesley.

PASS, S. (2004). *Parallel paths to Constructivism*. USA: Information Age Publishing.

PFUNDT, H. y DUIT, R. (1998). *Bibliography: Students’ alternative frameworks and science education*. 6<sup>th</sup> edition. Kiel-Germany (Institute for Science Education at the University of Kiel).

PHILLIPS, M. (1963). Electromotive force and the law of induction. *The Physics Teacher*, 1 (4), pp 155-158.

PIAGET, J. y INHELDER, B. (1956). *The child’s conception of space*. London: Routledge.

PIAGET, J. (1968). *La construcción de lo real en el niño*. Buenos Aires: Proteo.

PIAGET, J. (1969a). *Biología y conocimiento: Ensayo sobre las relaciones entre las regulaciones orgánicas y los procesos cognoscitivos*. Mexico: Siglo Veintiuno Editores.

PIAGET, J. (1969b). *El nacimiento de la inteligencia en el niño*. Madrid: Aguilar.

PIAGET, J. (1970). *La epistemología genética*. Barcelona: Redondo.

PINTRICH, P. R., MARX, R. W. y BOYLE, R. A. (1993). Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Research Review of Educational*, 63, pp 167-199.

POCOVI, M. C. y HOYOS, H. (2004). Estudio de caso de la comprensión de diferencia de potencial y fem en alumnos avanzados y graduados en Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 9 (3), pp 337-348.

POSNER, G., STRIKE, K., HEWSON, P. y GERTZOG, W. (1982). Accomodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66 (2), pp. 211-227.

REIGOSA, C. E. (2002). *Discurso en el laboratorio durante la resolución de problemas de física y química: Acciones, justificaciones, cultura científica y mediación*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, España.

REIF, F. (1981). Generalized Ohm's law, potential difference, and voltage measurements. *American Journal of Physics*, 50 (11), pp 1048-1049.

ROCHE, J. (1987). Explaining electromagnetic induction a critical re-examination: The clinical value of history in physics. *Physics Education*, 22, pp 91-99.

ROCHE, J. (2003). What is potential energy? *European Journal of Physics*, 24, pp 185-196.

RODRIGUEZ, A. J. (1998). Strategies for counterresistance: Toward sociotransformative constructivism and learning to teach science for diversity and for understanding. *Journal of Research in Science Teaching*, 35 (6), pp 589-622.

ROSE-INNES, A. C. (1985). Electromotive Force. *Physics Education*, 20 (6), pp 272-274.

RUDGE, D. y HOWE, E. (2004). Incorporating History into Science Classroom. *The Science Teacher*, 71(9), pp 52-57.

SALTIEL, E. y VIENNOT, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las ciencias*, 3 (12), pp137-144.

SANDOVAL, W. A. y REISER, B. J. (2004). Explanation-Driven inquiry: Integrating conceptual and epistemic scaffolds for scientific inquiry. *Science Education*, 88, pp 345-372.

SANDOVAL, W. A. (2005). Understanding student's practical epistemologies and their influence on learning through inquiry. *Science Education*, 89 (4), pp 634-656.

SANDOVAL, W. A. y MILLWOOD, K. A. (2008). *What can argumentation tell us about epistemology?* En S. Erduran y M. P. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education: Perspectives from classroom-based research* (pp 71-88). Dordrecht: Springer.

SAVERY, J. R. y DUFFY, T. M. (1995). Problem based learning: an instructional model and its constructivist framework. *Educational Technology*, 35, pp 31-36.

SCOTT, P. (1998). Teacher talk and meaning making in science classroom: A vygotskian analysis and review. *Studies in Science Education*, 32, pp 45-80.

SCOTT, P., ASOKO, H. y Leach, J. (2008). Student conceptions and conceptual learning in science. En A. K. Abell y N. G. Lederman, *Handbook of research on science education* (pp 31-52). New York: Routledge.

SEROGLOU, F., PANAGIOTIS, K. y VASSILIS, T. (1998). History of Sciences and instructional design: the case of electromagnetism. *Science and Education*, 7, pp 261-280.

SEROGLOU, F. Y KOUMARAS, P. (2001). The Contribution of the History of Physics in Physics Education: A Review. *Science and Education*, 10, pp 153-172.

SHAFFER, P. S. y McDERMOTT, L. C. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: Design of instructional strategies. *American Journal of Physics*, 60 (11), pp 1003-1013.

SHIPSTONE, D. M., RHÖNECK, C. V., JUNG, W., KÄRRQUIST, J., DUPIN, J. JOHSUA, S. y LICHT, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International journal of Science Education*, 10 (3), pp 303-316.

SHUELL, T. (1987). Cognitive psychology and conceptual change: Implications for teaching science. *Science Education*, 71, pp 239-250.

SJØBERG, S. (2007). Constructivism and learning. Em E. Baker, B. McGaw y P. Peterson (Orgs.), *International Encyclopaedia of Education*. Oxford: Elsevier. [On-line]. Disponible en:

[http://folk.uio.no/sveinsj/Constructivism\\_and\\_learning\\_Sjoberg.pdf](http://folk.uio.no/sveinsj/Constructivism_and_learning_Sjoberg.pdf).

Recuperado: 22/11/2011.

SOLOMON, J. (2002). Science Stories and Science Texts: What can they do for our students? *Studies in Science Education*, 37, pp 85-105.

STEINBERG, M. S. (2008). Inventing Electric Potential. *Foundations of Science*, 13(2), pp 163-175.

STERN, L. y ROSEMAN, J. E. (2004). Can middle-school science textbooks help students learn important ideas? Findings from project 2061's curriculum evaluation study: life science. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(6), pp 71-87.

SUTTON, G. (1981). The politics of science in early Napoleonic france: The case of the voltaic pile. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 11 (2), pp 329-366.

TABER, K. S. (2003). The atom in the chemistry curriculum: fundamental concept, teaching model or epistemological obstacle. *Foundations of Chemistry*, 5, pp 43-84.

TABER, K. S. (2006). Constructivism's new clothes: the trivial, the contingent, and a progressive research programme into the learning of science. *Foundations of Chemistry*, 8, pp 189-219.

TATON, R. (1988). *Historia General de las Ciencias*. Madrid: Ediciones Orbis.

THACKRAY, A. (1980). History of Science, en P.T. Durbin (Ed.). *A guide to the culture of science, technology and medicine*, New York: Free Press.

THONG, W. M. y GUNSTONE, R. (2008). Some student conceptions of electromagnetic induction. *Research in Science Education*, 38, pp 31-44.

TOULMIN, S. (2007). *Los usos de la argumentación*. Barcelona: Ediciones Peninsula.

TSEITLIN, M. y GALILI, I. (2005). Physics teaching in the search for its self. From Physics as a discipline to Physics as a discipline-culture. *Science and Education*, 14, pp 235-261.

VARNEY, R.N. y FISHER, L.H. (1980). Electromotive force: Volta's forgotten concept. *American Journal of Physics*, 48 (5), pp 405-408.

VERHEIJ, B. (2005). Evaluating arguments based on Toulmin's scheme. *Argumentation*, 19, pp 347-371.

VIENNOT, L. (2002). *Razonar en física: La contribución del sentido común*. Madrid: A. Machado Libros S.A.

VOSNIADOU, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, pp 45-69.

VOSNIADOU, S. (2002). Mental models in conceptual development. En L. Magnani y N. Nersessian (Eds.), *Model-Based Reasoning: Science, Technology, Values* (pp 353-368). New York: Kluwer Academic Press.

VYGOTSKY, L. S. (1978). Interaction between learning and development. En M. Gauvain y M. Cole (Eds.), *Readings on the development of children* (pp 29-36). New York: W. H. Freeman and Company.

VYGOTSKY, L. S. (1985). *Pensamiento y lenguaje: teoría del desarrollo cultural de las funciones psíquicas*. Buenos Aires: Editorial La Pléyade.

VYGOTSKY, L. S. (2001). *Psicología Pedagógica. Un curso breve*. Buenos Aires: Editorial Aique.

WANDERSEE, J. H. (1992). The historicality of cognition: implications for Science Teaching and Learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 29 (4), pp 423-434.

WANDERSEE, J. H., MINTZES, J. J. y NOVAK, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in Science. En D. L. Gabel (eds), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*. New York: Mcmillan Publications.

YOUNG, H. D. y FREEDMAN, R. A. (2009). *Física universitaria con física moderna, Vol. 2*. Addison-Wesley: Mexico.

## ANEXO

### BIBLIOGRAFÍA – LIBROS DE TEXTO ANALIZADOS

ALONSO, M. y FINN, E. J. (1995). *Physics*. England: Pearson Prentice Hall.

BAUER, W. y WESTFALL, G. D. (2011). *Física para ingeniería y ciencias*. México: McGraw-Hill.

CHABAY, R. W. y SHERWOOD, B. A. (2011). *Matter and Interactions. Volume II: Electric and Magnetic interactions*. USA: John Wiley and Sons.

FISHBANE, P. M., GASIOROWICZ, S. y THORNTON, S. T. (1993). *Physics for Scientists and Engineers, Vol. II*. USA: Prentice Hall Inc.

GIANCOLI, D. C. (2008). *Physics for scientists and engineers, vol.2*. USA: Pearson Education.

GUERRA, M., CORREA, J., NÚÑEZ, I. y SCARON, J. M. (1985). *Física: Elementos Fundamentales. Tomo II: Campo electromagnético. Campo gravitatorio*. Barcelona: Editorial Riverté.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. y KRANE, K. S. (2002). *Physics, volume two*. New York: John Wiley and Sons.

HEWITT, P. G. y WOLF, P. R. (2008). *Conceptual Physics Fundamental*. USA: Addison-Wesley Publishing Company.

KNIGHT, R. D. (2008). *Physics for scientist and engineers: A strategic approach*. USA: Pearson Addison Wesley.

LEA, S. M. y BURKE, J. R. (2001). *Física: La naturaleza de las cosas. Volumen 2: Campos electromagnéticos hasta la física del siglo XX*. México: International Thomson.

MOORE, T. A. (2003). *Six ideas that shaped physics*. USA: McGraw-Hill Companies.

OHANIAN, H. C. y MARKERT, J. T. (2007). *Physics for engineers and scientists*. USA: W. W. Norton and Company.

SERWAY, R. A. y JEWETT, J. W. (2010). *Physics for Scientist and Engineers*. USA: Cengage Learning.

TIPLER, P. A. y MOSCA, G. (2008). *Physics for scientists and engineers*. New York: W. H. Freeman and Company.

WILSON, J. D. y BUFFA, A. J. (2003). *College Physics, fifth edition*. USA: Pearson Education.

YOUNG, H. D. y FREEDMAN, R. A. (2004). *University Physics*. USA: Pearson Addison Wesley.